

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Ostrava 2014**

**Martin Mondřík**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Šíření signálů buňkových sítí uvnitř budov**  
**Signal Propagation of Cellular Networks inside**  
**Buildings**

**Ostrava 2014**

**Martin Mondřík**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Martin Mondřík**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Šíření signálů buňkových sítí uvnitř budov  
Signal Propagation of Cellular Networks inside Buildings

Zásady pro vypracování:

Cílem této práce je provést analýzu pokrytí a praktické ověření šíření signálů systému GSM uvnitř budov.

1. Teoretický popis problematiky šíření vln v pásmu UHF.
2. Analýza pokrytí signálem GSM uvnitř budov s využitím dostupných softwarových nástrojů.
3. Ověření dosaženého pokrytí praktickým měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

Saunders S., Zavala A.: Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Wiley, 2007, ISBN: 978-0-470-84879-1


Pechač P., Zvánovec S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, BEN, 2007, ISBN: 978-80-7300-223-7

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Šebesta, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6. května 2014

.....  
Podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi poskytli cenné rady a připomínky při psaní této bakalářské práce, především pak vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Šebestovi, Ph.D.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá analýzou problematiky šíření signálů uvnitř budov. Srovnává metody softwarové simulace a praktického měření. Softwarová simulace šíření signálu byla provedena ve dvou rozdílných programech. Praktické měření bylo provedeno na dvou rozdílných mobilních telefonech. Srovnání těchto metod pak určuje doporučení softwaru podle přesnosti nebo časové náročnosti celého měření. Měření bylo zaměřeno na přijímanou úroveň přijímačem.

## **Klíčová slova**

šíření signálu; uvnitř budov; simulace; software; srovnání metod; pokrytí; měření; GSM; UHF

## **Abstract**

This thesis analyzes the problems of propagation of signals inside buildings. It compares methods of software simulations and practical measurements. Software simulation of signal propagation was carried out in two different programs. Practical measurements were carried out on two different mobile phones. Comparison of these methods determines the recommendation for software by accuracy or time demands of the measurement. Measurements were focused on the received level by receiver.

## **Key Words**

signal propagation; indoor; simulation; software; comparison of methods; coverage; measurement; GSM; UHF

## Seznam použitých pojmů

AutoCAD	– software pro rýsování vektorových plánů
Bluetooth	– bezdrátová technologie pro přenos dat na krátkou vzdálenost
Datasheet	– katalogový list s technickými údaji
Feeder	– kabel přenášející energii z BTS do antény
Hardware	– technické vybavení počítače
Mobiliář	– nábytek, vybavení budovy
Smartphone	– mobilní telefon s pokročilým operačním systémem
Software	– programové vybavení počítače
WiFi	– bezdrátová technologie pro přenos dat (Wireless Fidelity)

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

2D	– dvojdimenzionální prostor
3D	– trojdimenzionální prostor
BTS	– základnová stanice (Base Transceiver Station)
CID	– identifikační číslo buňky (Cell Identification)
CPU	– hlavní výpočetní jednotka (Central Processing Unit)
CUDA	– paralelní vícejádrová technologie (Compute Unified Device Architecture)
DXF	– formát souboru pro program AutoCAD (Drawing Interchange Format)
FSL	– ztráty šířením ve volném prostoru (Free Space Loss)
GPS	– globální polohovací systém (Global Positioning System)
GPU	– grafická výpočetní jednotka (Graphics Processing Unit)
GSM	– globální systém pro mobilní komunikaci (Global System for Mobile Communications)
HW	– hardware
OS	– operační systém (Operating System)
SW	– software
UHF	– ultra krátké vlny (Ultra High Frequency)

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBEČNÝ POPIS PÁSMU UHF .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>ZÁKLADY ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN.....</b>	<b>3</b>
3.1	ELEKTROMAGNETICKÁ VLNA .....	4
3.2	ÚTLUM ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN .....	7
3.2.1	ZTRÁTY.....	7
3.2.2	SPÁDOVÝ KOEFICIENT .....	8
3.2.3	FRESNELŮV ZLOM .....	8
<b>4</b>	<b>ŠÍŘENÍ VLN V ZÁSTAVBĚ .....</b>	<b>10</b>
4.1	ROZDĚLENÍ BUNĚK PODLE VELIKOSTI.....	10
4.2	ŠÍŘENÍ VLN V ZÁSTAVBĚ.....	11
4.3	ŠÍŘENÍ VLN UVNITŘ BUDOV .....	11
<b>5</b>	<b>MODELÝ ŠÍŘENÍ .....</b>	<b>12</b>
5.1	ROZDĚLENÍ MODELŮ ŠÍŘENÍ VLN .....	12
5.2	MODELÝ ŠÍŘENÍ VLN.....	12
5.2.1	ONE-SLOPE MODEL .....	13
5.2.2	MULTI-WALL MODEL.....	14
5.2.3	OPTICKÉ MODELÝ .....	15
<b>6</b>	<b>SOFTWAREVÉ NÁSTROJE .....</b>	<b>17</b>
6.1	DOSTUPNÉ SOFTWAREVÉ NÁSTROJE .....	17
6.1.1	POPIS I-PROP.....	17
6.1.2	POPIS WIRELESS INSITE .....	18
6.2	SROVNÁNÍ SOFTWAREVÝCH NÁSTROJŮ .....	22
<b>7</b>	<b>SIMULACE A PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....</b>	<b>23</b>
7.1	NASTAVENÍ I-PROP.....	23
7.2	NASTAVENÍ WIRELESS INSITE .....	24
7.3	POPIS PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ .....	25
<b>8</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>27</b>
8.1	I-PROP .....	28
8.2	WIRELESS INSITE .....	28
8.3	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	28
8.4	POROVNÁNÍ .....	29
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>31</b>



# 1 Úvod

Teorie šíření vln je velice široké téma. Zvládnutí návrhu rádiového spoje či predikce dostupnosti signálu bez znalosti matematických výpočtů a mechanismů šíření je snazší a rychlejší s využitím simulačních softwarů oproti početnému řešení nebo praktickým měřením člověkem.

Tato práce je zaměřena na dostupný software na výpočty šíření signálu uvnitř budov v pásmu UHF a jejich praktické ověření. Pro simulaci šíření signálů existuje celá řada nástrojů. Výběr se značně zužuje, pokud je požadavek jen na simulační software pro šíření uvnitř budov.

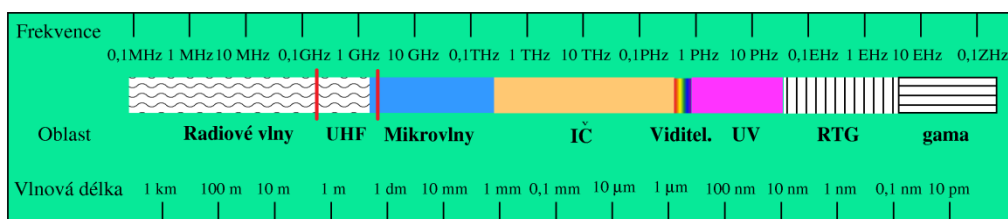
Některé firmy nabízejí vypracování hotových simulací bez přístupu k softwaru vyvíjeného vlastní firmou. Vedle toho je i dostupný software, který ve většině případů spravují velké firmy specializující se na tuto problematiku. V mnoha případech se jedná o placený software, který obvykle firmy nezpřístupňují mimo firmu pro volné použití. Ojedinele firmy poskytují na žádost s uvedením účelu použití zkušební licenci na určitou dobu nebo verze s omezenými funkcemi. Nabídky takovýchto softwarů jsou proměnlivé, a to na základě pokročilosti vývoje softwaru nebo prodejní politiky.

Ve škole je dostupný simulátor I-Prop v placené verzi se všemi funkcemi. K porovnání se zmíněným softwarem jsem zvolil dostupnou časově omezenou verzi programu Wireless InSite.

Praktická část práce má za cíl ověřit přesnost simulačních softwarů oproti reálnému měření. Má za úkol také srovnat jednotlivé nástroje mezi sebou z hlediska grafického prostředí, náročnosti na ovládání, funkcionality a získaných výsledků za stejné situace.

## 2 Obecný popis pásma UHF

Pásma UHF se nachází převážně v oblasti rádiových vln, ale zasahuje i do oblasti mikrovln. Je definováno pro vlny s frekvencí v rozmezí od 300 MHz do 3 GHz. V tomto pásmu je například vysílání digitální televize, rádiové služby, telefonní a datové služby pro mobilní zařízení, nelicencovaná pásma pro radioamatérská zařízení, WiFi, mikrovlnné trouby, služby GPS, lékařské přístroje na diagnostiku nebo ve zbrojním průmyslu. Vlnová délka vln v pásmu UHF je 1 m pro 300 MHz až po 10 cm pro 3 GHz, podle toho se také často označují jako decimetrové vlny. Zařazení pásma UHF do frekvenčního spektra je vidět na obrázku.

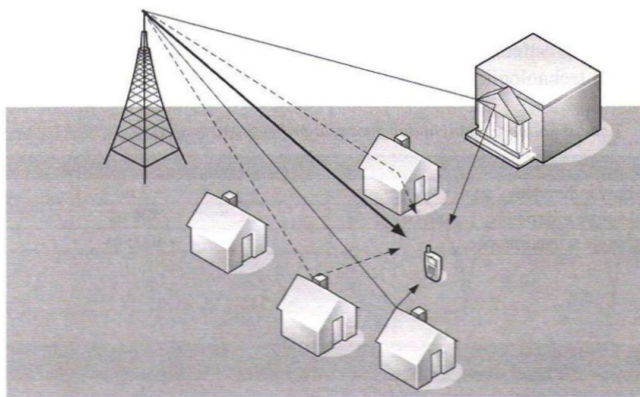


Obrázek 2.1: Frekvenční spektrum [9]

### 3 Základy šíření elektromagnetických vln

Základní rovnice teorie o šíření elektromagnetických vln jsou odvozeny z Maxwellových rovnic [1]. Nejrozsáhlejší oblastí pro šíření rádiových spojů je teorie pro šíření elektromagnetických vln v atmosféře. Zde jsou vlny rozděleny do tří základních skupin - ionosferické, troposférické a přízemní. Ionosferická a troposférická vlna se šíří odrazy v atmosféře, působí na ně jiné vlivy než na přízemní vlny. Přízemní vlny se dále rozdělují na povrchové a prostorové. Přízemní povrchová vlna se šíří podél zemského povrchu podél rozhraní země - vzduch. Přízemní povrchová vlna se šíří přímočaře nebo pomocí odrazu od zemského povrchu nebo překážek, například střechy budov. Je důležitá pro frekvence v řádu desítek až stovek megahertzů. Pomocí těchto vln se šíří většina rádiových služeb. Cílem zájmu této práce je šíření přízemní prostorové vlna šířící se v prostoru nad zemským povrchem.

Při šíření vln při pozemních rádiových spojkách je velice důležité zahrnout i oblast vícecestného šíření, kdy se elektromagnetické vlny šíří i mimo přímou optickou viditelnost pomocí odrazu od zemského povrchu a od okolních objektů. Tyto vlny se označují jako druhotné a s přímou vlnou se sčítají. Druhotných vln může být nekonečně mnoho především v zástavbě kvůli velké členitosti prostředí. Protože je šíření vln pomocí vlnoploch velice složité znázornit, používají se pro zjednodušené znázornění šíření vln diskrétními paprsky podobně jako v oboru optiky. Při vícecestném šíření dochází také k různým problémům, jako je fázový posun druhotné vlny nebo časové zpoždění, které mohou způsobit interferenci vln.



Obrázek 3.1: Vícecestné šíření v pozemních rádiových spojkách [1]

### 3.1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetické vlny jsou tvořeny dvěma složkami, elektrickou a magnetickou. Ty jsou definovány vektorem intenzity elektrického pole  $E$  a vektorem magnetického pole  $B$ . Ty jsou na sebe navzájem kolmé. Směr vektoru složky elektrického pole  $E$  určuje polarizaci elektromagnetických vln. Ta je vertikální nebo horizontální. Jestliže je vektor  $E$  kolmý na rovinu dopadu, jedná se o horizontální polarizaci a rovinou rozhraní je zemský povrch. V případě, kdy je vektor  $E$  rovnoběžný s rovinou dopadu, se jedná o vertikální polarizaci. [2]

Všechny elektromagnetické vlny se šíří v prázdném prostředí (ve vakuu) maximální rychlostí světla  $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ . Vztah pro výpočet rychlosti světla pro elektromagnetické vlny vychází z periody, resp. frekvence a vlnové délky.

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

kde  $c$  rychlost světla ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $\lambda$  vlnová délka (m)  
 $f$  frekvence vlnění (Hz)

V troposféře je rychlost šíření elektromagnetických vln téměř stejná jako ve vakuu. V praxi se tedy počítá s rychlostí světla jako charakteristickým parametrem pro rychlosti šíření elektromagnetických vln.

Vlnová délka  $\lambda$  je dalším charakteristickým parametrem vlnění, který určuje délku mezi stejnými úseky vlny se stejnou fází.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.2)$$

kde  $\lambda$  vlnová délka (m)  
 $v$  fázová rychlost šíření vlnění ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $f$  frekvence vlnění (Hz)

Šíření vln je především závislé na frekvenci respektive na vlnové délce nepřímo úměrné frekvenci, což je zřejmé i ze vzorce. Vlnová délka také určuje, jak velké překážky je vlnění schopné překonat a také od jak velkých ploch se může odrazit.

Fázová rychlost vlnění určuje rychlost pohybu míst se stejnou fází, kterou se vlnění pohybuje ve směru šíření. Ta je dána vlastnostmi prostředí, permitivitou  $\varepsilon$  a permeabilitou  $\mu$  prostředí.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = c \quad (3.3)$$

kde  $v$  fázová rychlost šíření vlnění ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $\varepsilon$  permitivita prostředí ( $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ )  
 $\mu$  permeabilita prostředí ( $\text{NA}^{-2}$ )  
 $c$  rychlost světla ve vakuu ( $\text{ms}^{-1}$ )

Permitivita i permeabilita vzduchu v troposféře se téměř blíží vlastnostem vakua, proto se pro výpočty používá rychlost světla.

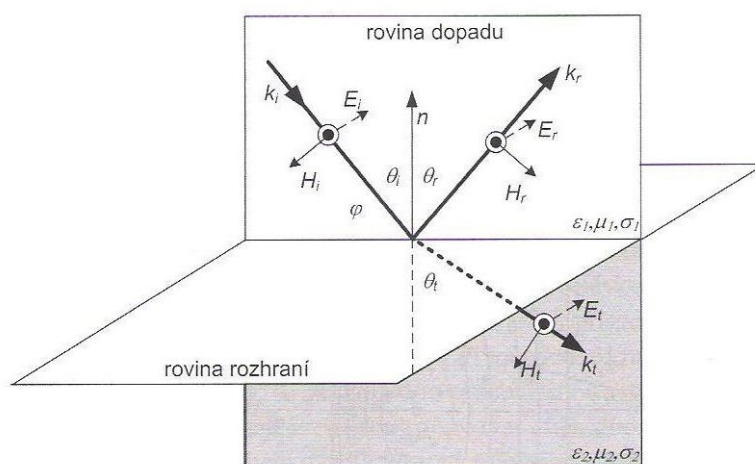
Elektromagnetické vlny podléhají zákonům odrazu a lomu. Pro praktické řešení problémů se nepoužívají vlnoplochy, ale pouze paprsky. Zákon odrazu říká, že úhel dopadu  $\alpha$  je stejný jako úhel odrazu  $\alpha'$  a paprsek zůstává ve stejné rovině dopadu.

$$\alpha = \alpha' \quad (3.4)$$

Zákon lomu říká, že paprsek dopadající na rozhraní dvou prostředí se láme a prochází rozhraním pod úhlem závislým na úhlu dopadu na rozhraní a indexech lomu  $n$  obou prostředí. Vzájemný vztah mezi úhly a indexy lomu popisuje Snellův zákon.

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (3.5)$$

kde  $n_1, n_2$  indexy lomu (bez jednotky)  
 $\alpha_1$  úhel dopadajícího paprsku ( $^\circ$ )  
 $\alpha_2$  úhel lomeného paprsku ( $^\circ$ )



Obrázek 3.2: Odraz a lom elektromagnetické vlny [2]

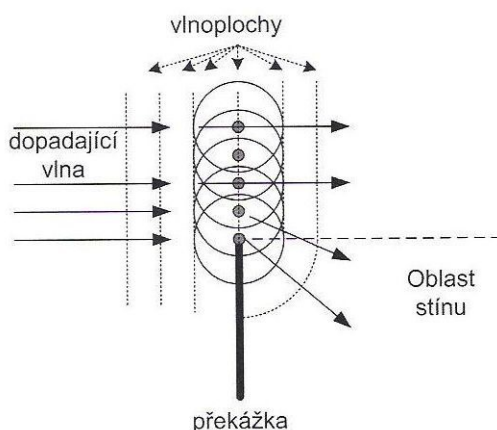
Interference je vzájemné ovlivňování vln. Vlny se mohou v některých místech vzájemně rušit nebo skládat. Pokud vlna dopadá na rozhraní dvou rozdílných prostředí, odrazí se. V bodě příjmu vznikají zeslabená a zesílená místa s fázovým posunem vln. Pokud je dráhový rozdíl  $\Delta$  roven sudému počtu půlvln, dojde k zesílení, protože vlny mají shodnou amplitudu i fázi. Naopak když mají stejnou amplitudu ale opačnou fázi, dochází k odečtu vln a velkému zeslabení. [2]

Dráhový rozdíl je definován vzorcem:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (3.6)$$

kde  $\Delta$  dráhový rozdíl (m)  
 $k$  celočíselné násobky (bez jednotky)  
 $\lambda$  vlnová délka (m)

Difrakce neboli ohyb vzniká na štěrbinách nebo hranách objektů s částmi, které jsou velikostně srovnatelné s vlnovou délkou. Vlny se na hranách ohýbají a pokračují dále prostředím i v oblasti geometrického stínu mimo přímku paprsku.



Obrázek 3.3: Princip šíření vln do oblasti stínu za překážkou [2]

Intenzita elektromagnetického pole je dána vektorem intenzity elektrického pole  $E$  a vektorem magnetické indukce  $B$ , které popisují velikost intenzity v každém bodu prostoru. Tato veličina je závislá na vzdálenosti od zdroje vlnění. Pro výpočty se používají zjednodušené modely, protože šíření elektromagnetického vlnění je velice složité. Složitost zahrnuje veškeré výše uvedené parametry, zákony a různorodé prostředí, které může být proměnlivé v čase. Pro volný prostor v ideálních podmínkách platí:

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_V G_V}}{d} \quad (3.7)$$

kde  $P_V$  výkon na vstupu vysílací antény (W)  
 $G_V$  zisk vysílací antény v příslušném směru (dBi)  
 $d$  vzdálenost vysílací antény a bodu příjmu (m)

Rozptyl elektromagnetických vln nastává po střetu vlny s izolovanou částicí, která je velikostně srovnatelná s vlnovou délkou, například dešťová kapka, sněhová vločka apod. V této částici se po dopadu elektromagnetické vlny vybudí elektrické pole, polarizuje se a poté nastává sekundární záření vytvářející rozptyl vlny. [2]

## 3.2 Útlum elektromagnetických vln

Útlum neboli únik je ztráta výkonu přenosové vlny vznikající mezi anténou vysílače a anténou přijímače. Existuje mnoho druhů příčin tohoto jevu. Některé jsou trvalé jako např. špatná konstrukce rádiového spoje, běžné ztráty ve volném prostoru. Další mohou být dočasné nebo náhodné, např. útlum hydrometeority nebo proměnlivost prostředí. [1]

### 3.2.1 Ztráty

Pro šíření vln v budově odpadá počítání sférických refrakcí, útlum hydrometeority a atmosférických plynů nebo rozdílné podmínky změn v atmosféře vlivem denní doby apod. Naopak zde přibývají proměnlivé podmínky útlumů jako procházející lidé, pohyb strojů nebo změna polohy dveří a oken. Některé moderní softwary umožňují i výpočty s mobiliářem.

Kvalitu přijímaného signálu určuje také vhodné umístění a technické provedení antény, konektoru a vysílače nebo přijímače. Při uvažování mobilních telefonů může různé držení antény uživatelem mít také rozdílný útlum. Hlavně tato zařízení mohou mít antény umístěné nebo konstruované různorodě, proto se jejich vyzařovací diagram pro zjednodušení považuje za kruhový. [3]

Při šíření volným prostorem ztráty výkonu přenosové vlny rostou se vzdáleností nebo také můžeme říci, že klesá intenzita elektrického pole. Ztráty volným prostorem  $L_{FSL}$  pro kulovou vlnu v decibelech můžeme vyjádřit takto:

$$L_{FSL} = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (3.8)$$

kde  $L_{FSL}$  ztráty ve volném prostoru (dB)  
 $d$  vzdálenost (km)

nebo po nahrazení veličin běžnějšími veličinami známými z praxe můžeme vztah vyjádřit jako

$$L_{FSL} = 32,4 + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) \quad (3.9)$$

kde  $f_{MHz}$  frekvence (MHz)  
 $d_{km}$  vzdálenost (km)

V praxi se používá pro vyjádření výkonu spoje přenosová rovnice vyjádřená v decibelech.

$$P_P = P_V + G_V + G_P - L_{FSL} - L \quad (3.10)$$

kde  $P_P, P_V$  výkony (dBm)  
 $G_V, G_P$  zisky antén (dB)  
 $L_{FSL}$  ztráty ve volném prostoru (dB)  
 $L$  ostatní ztráty (dB)

Ostatní ztráty mohou zahrnovat impedanční nebo polarizační nepřizpůsobení, útlum anténních kabelů, útlum na konektorech nebo ostatní ztráty vznikající při šíření mezi anténami. [2]

Pomalé úniky jsou způsobeny zastíněním spoje terénem, zástavbou, vegetací, lidmi apod. nebo pohybem mobilní antény. Přijímaná úroveň kolísá velmi pomalu, ale výsledný pokles může být až o několik desítek dB oproti původní hodnotě přijímaného signálu. [5]

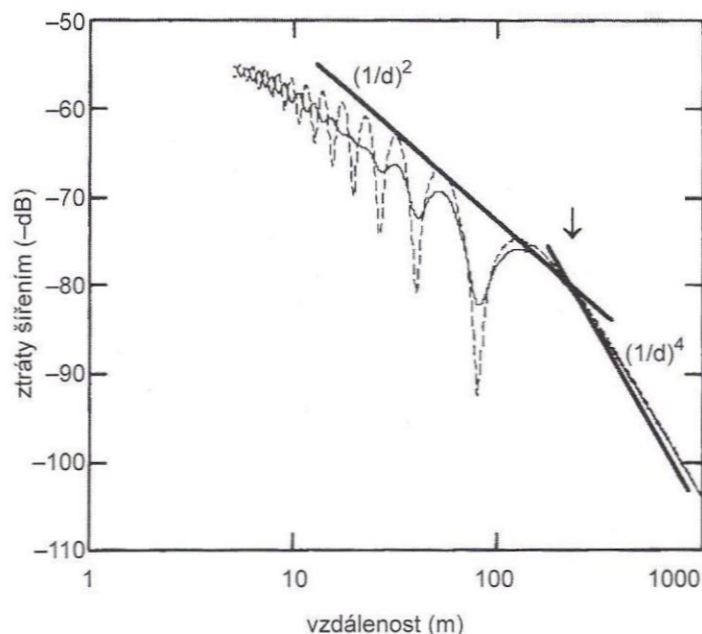
Rychlé úniky jsou způsobeny z větší části vícecestným zastíněním signálu a Dopplerovým jevem neboli frekvenční posun přijímané frekvence oproti původní vysílané, který vzniká při pohybu mobilní antény a okolních objektů. Přijímaná úroveň kolísá rychle a způsobuje velké výkyvy úrovně přijímaného signálu. [5]

#### 3.2.2 Spádový koeficient

Nejdůležitější parametr pro většinu modelů je spádový koeficient  $n$  (ang. Slope), který určuje míru útlumu vln skrz prostředí. Čím je nižší hodnota koeficientu  $n$ , tím se signál šíří lépe. Tento parametr se získává experimentálně. Graficky se znázorňuje jako aproximace hodnot průběhu přijímané výkonové úrovně signálu v dB v závislosti na vzdálenosti v logaritmickém měřítku. Pro jednoduché simulace jsou hodnoty definovány různě pro dané prostředí dle použité literatury, ale v zásadě mají hodnoty velice podobné. [1]

#### 3.2.3 Fresnelův zlom

Místo, kde se láme spádová křivka. Před Fresnelovým zlomem je typický pokles o 20 dB na dekádu, zatímco za tímto zlomem je pokles už 40 dB na dekádu.



Obrázek 3.4: Průběh spádové křivky se vzdáleností podle dvoupráskového modelu s vyznačením Fresnelova zlomu (tenké čáry – exaktní výpočet, silné čáry – aproximace) [1]



K Fresnelovu zlomu dochází v místě, ve kterém je dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku roven právě polovině vlnové délky. Při malých výškách antén vzhledem k jejich vzdálenosti lze vzdálenost Fresnelova zlomu  $d_0$  vyjádřit vzorcem:

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (3.11)$$

kde  $d_0$  vzdálenost Fresnelova zlomu (m)  
 $h_1, h_2$  výšky antén spoje (m)  
 $\lambda$  vlnová délka (m)

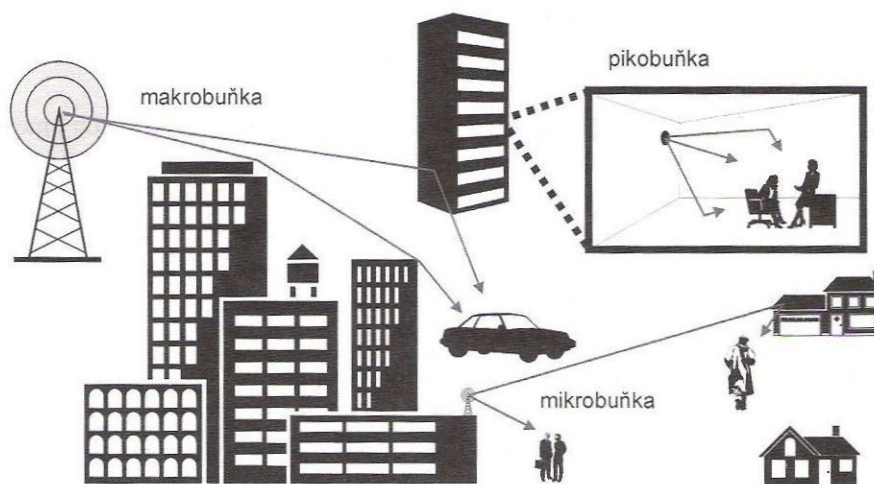
Určení polohy Fresnelova zlomu je pro predikci velice důležité, protože se v bodě zlomu významně mění závislost útlumu šířením. Pro makrobuňky a velmi malé pikobuňky lze předpokládat pouze jeden stav a to za nebo před zlomem, tj. spádovou křivku bez zlomu. U středně velkých mikrobuněk se výpočet ztrát bez zahrnutí zlomu neobejde.

## 4 Šíření vln v zástavbě

Oblast problematiky šíření elektromagnetických vln v zástavbě je široké téma, které je potřeba rozdělit na menší části, protože u každé z nich nastávají jiné fyzikální jevy. Musí se tedy řešit zcela jinou metodou. Ve venkovních prostorách se vlny mohou šířit ve větších výškách než při šíření v interiéru. Také šíření vln ve velkých městech je rozdílné od šíření v předměstských oblastech. [1]

### 4.1 Rozdělení buněk podle velikosti

- Makrobuňka – pevná anténa je umístěna nad úrovní střech zástavby a je určena pro oblast s malou hustotou zalidnění. Její poloměr se pohybuje od 1 km až 30 km. Předpokládá se zde přímá viditelnost antén.
- Mikrobuňka – pevná anténa je pod úrovní okolních střech zástavby a pokrývá oblast s velkou hustotou zalidnění. Její poloměr se pohybuje 100 m do 1 km. Zde se počítá i s odrazy od budov, ohybem vln na hranách apod.
- Pikobuňka – pevná anténa je uvnitř budov a pokrývá obvykle uzavřené prostory. Používá se pro prostory se zvýšenou hustotou výskytu lidí, například nákupní centra, nádraží, burzy, kanceláře. Rozmístění antén je individuální podle typu objektu. Její poloměr se pohybuje od řádu desítek metrů do maximálně 200 m.
- Femtobuňka – nepatří do obecného rozdělení, používá dodatečné antény uvnitř budov pro rozšíření signálu sítě o poloměru v řádu jednotek metrů do maximálně 50 m. Používá se pro dodatečné pokrytí domácností nebo kanceláří s menším počtem lidí.



Obrázek 4.1: Rozdělení buněk a šíření vln v zástavbě [1]

## 4.2 Šíření vln v zástavbě

Popis této problematiky je složitý kvůli nestálé povaze objektů v zástavbě v čase, například pohybující se automobily. V takovém prostředí dochází také k difracím vln na hranách, odrazům, rozptylům nebo změnám po průchodu překážkou.

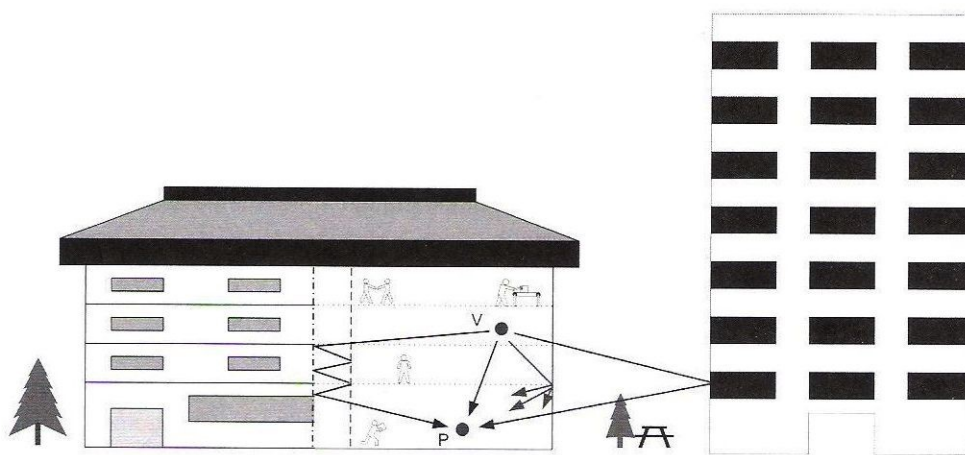
V makrobuňkách, kde anténa základnové stanice je umístěna výš než okolní střechy zástavby a mobilní anténa uživatele je ve výšce ulic, se šíří vlny hlavně pomocí difrakcí na hranách střech a odrazem od okolních objektů.

V mikrobuňkách bývají antény základnových stanic pod úrovní okolní zástavby, takže se vlny šíří pomocí odrazů podél ulic. Chovají se podobně jako ve vlnovodu.

Řešení šíření vln vně budov je pro predikci úrovně signálu pronikající pláštěm budovy také důležité, pokud není uvnitř budovy instalována pikobuňka nebo jiná anténa rozšiřující signál po budově. Měření se pak může provést tak, že se změří úroveň přijímaného signálu na plášti budovy. Tato hodnota poslouží jako fiktivní zdroj pro vnitřní pokrytí s využitím modelů pro pikobuňku. [1]

## 4.3 Šíření vln uvnitř budov

Toto téma popisuje hlavně šíření vln pro mobilní spoje, tj. když obě antény jsou uvnitř budovy, například pikobuňky. Elektromagnetické vlny v budově se šíří mnoha způsoby. Buď přímo průchodem stěnou nebo skrz podlaží, odrazem od rovných ploch nebo ohybem. V budovách se musí počítat také s vybavením objektu jako je nábytek apod. Šíření mezi podlažími ovlivňují i okolní budovy, od kterých se mohou vlny odrážet skrz okna. Ve výtahových šachtách a podlouhlých chodbách může nastat vlnovodný efekt. Zde se vlny šíří s minimálními ztrátami. Důležité je také zahrnout nestálost interiéru jakožto proměnlivé prostředí vlivem otevřených nebo zavřených dveří a oken. Pokud se jedná o pikobuňky nebo femtobuňky, pro tyto modely je zásadní i volba umístění antén a co největší využití výše popsaných metod šíření. Z praxe je vhodnější umístění antény blíže ke stropu, aby antény nestínilo vybavení objektu.



Obrázek 4.2: Alternativní cesty šíření signálu v pikobuňce [1]

## 5 Modely šíření

### 5.1 Rozdělení modelů šíření vln

Pro modelování je důležité znát službu, kterou chceme modelovat, abychom požadavky této služby přizpůsobili náročnosti výpočetního modelu. Analogové služby vyžadují menší přesnost, spolehlivost a nároky na výpočet než služby digitální. [7]

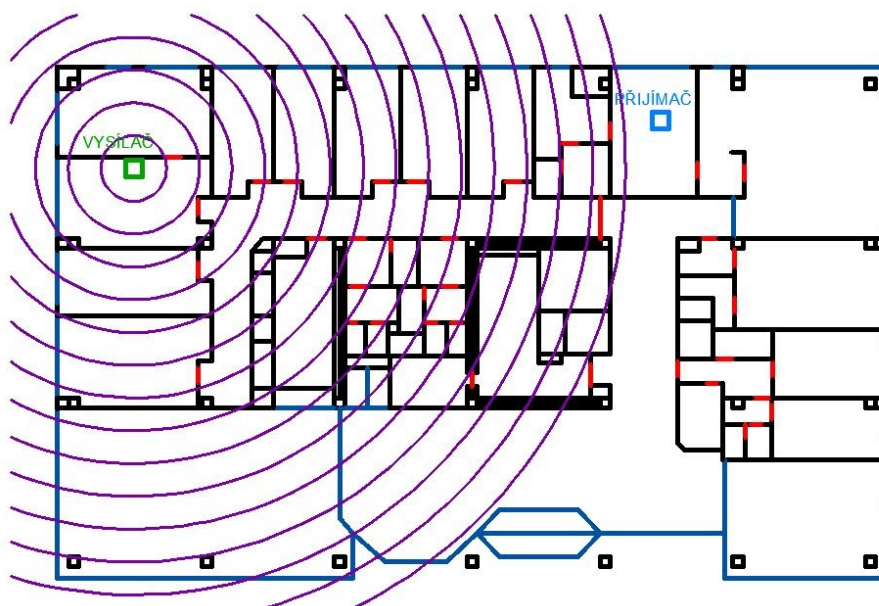
1. Empirický model – je model založený na mnoha praktických měřeních. Výsledky přenesené do grafu mohou být proloženy odpovídající funkcí a podle průběhu se určuje spádový koeficient. Nezohledňují se zde fyzikální principy šíření vln. V praxi jsou nejpoužívanější vzhledem k jejich jednoduchosti.
2. Deterministický model – je model založený jen na teoretických znalostech a výpočtech. Provádí se pomocí vlnových rovnic a zahrnuje fyzikální modely šíření. Jeho přesnost určují vstupní data, která může být velice obtížné a finančně nákladné získat.
3. Semi-deterministický model – neboli model semi-empirický zahrnující obě výše zmíněné metody. Základ je tvořen deterministickým modelem, který je různě upravován podle výsledků, které byly reálně naměřeny.

### 5.2 Modely šíření vln

Existuje více modelů, které kombinují různé metody výpočtů. Jejich použití závisí na náročnosti požadavku a také možnostech pro simulaci. Nejvíce používané jsou empirické modely kvůli jejich jednoduchosti. Nejsou příliš náročné na množství vstupních dat, výpočty a čas. Naproti tomu deterministické modely, do kterých je zahrnuto více výpočtů a složitých algoritmů, jsou přesnější a umožňují zahrnout i různé vlivy prostředí, např. útlum vln při průchodu zdí nebo různé odrazy. V této práci jsem se zaměřil na modely, které jsou vhodné pro modelování šíření vln uvnitř budov a jsou použity v softwarových nástrojích, tj. One-Slope Model, Multi-Wall Model a Ray tracing model.

### 5.2.1 One-Slope model

Jeho základ tvoří základní empirický model. Je vhodný pro rychlé predikce v interiéru díky jednoduchému výpočtu. Jeho výsledky jsou orientační a závisí na dobře zvolených empirických parametrech. Pokud jsou tyto parametry vhodně zvoleny, pak se odchylka blíží k 10 dB. Tento model počítá jen se vzdáleností a při použití všesměrové antény jsou výkonové úrovně rozloženy do soustředných kružnic. Do výpočtu se nezahrnuje členění interiéru.



Obrázek 5.1: One-Slope model

Výpočet je stejný jako pro základní empirický model. Uvažuje se zde s menšími vzdálenostmi než je Fresnelův zlom.

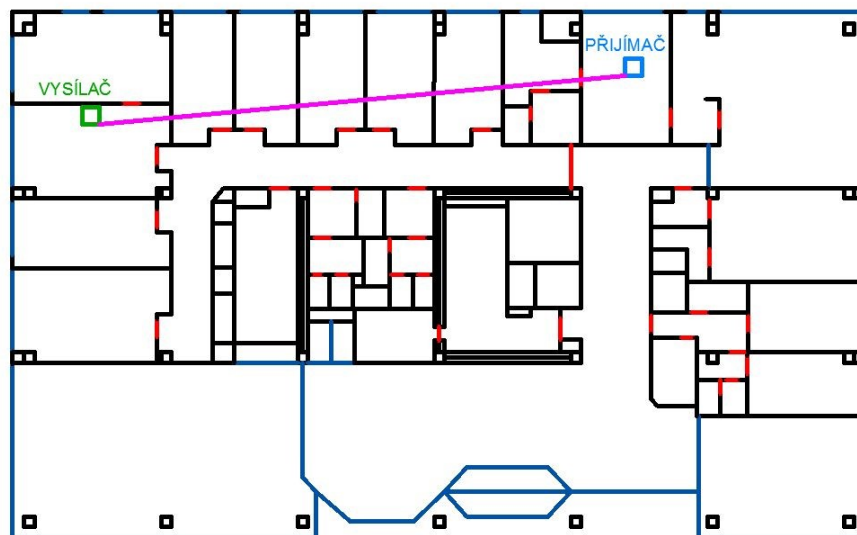
$$L(d) = L_1 + 10n \log(d) \quad (5.1)$$

- kde
- $L(d)$  predikovaná hodnota ztrát šířením (dB)
  - $d$  vzdálenost v m mezi základnovou stanicí a bodem pozorování ( $d > 1\text{ m}$ )
  - $L_1$  referenční hodnota ztrát v dB pro vzdálenost 1 m (dB)
  - $n$  spádový koeficient (bez jednotky)

Hodnoty parametrů  $L_1$  a  $n$  se získávají z velkého počtu měření v daném prostředí nebo přibližné hodnoty z již provedených měření v podobném typu prostředí. Při šíření signálu mezi podlažími je útlum šířením velmi různý z důvodu odlišných stropních konstrukcí. Pro frekvence v pásmu UHF se hodnoty pohybují v rozmezí 6-25 dB. Obvykle ale bývá útlum nižší, protože se vlny šíří i jinými cestami jako jsou šachty, odrazem od okolní zástavby, okny či difrakcí na vnějším plášti budovy. Celkové ztráty mohou být tedy menší.

### 5.2.2 Multi-Wall model

Jedná se o semi-empirický model. V jeho výpočtu je zahrnuto i konkrétní členění interiéru, tzn. různý spádový koeficient pro různá prostředí, skrz která vlny procházejí. Pro tento model tedy narůstá náročnost na potřebná vstupní data o rozmístění a typ příček, tudíž i náročnost na výpočet. Je mnohem přesnější, ale základním nedostatkem zůstává šíření chodbou pomocí vlnovodného efektu zahnutou chodbou. Model počítá jen průchod spojnici vysílač - přijímač a při průchodu bere v úvahu všechny příčky a podlaží.



Obrázek 5.2: Multi-Wall model

Výpočet ztrát pro tento model je následující:

$$L(d) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \sum_i k_{wi} L_{wi} + k_f \left( \frac{k_f + 2}{k_f + 1} b \right) L_f \quad (5.2)$$

kde	$L(d)$	predikovaná hodnota ztrát šířením (dB)
	$d$	vzdálenost (m)
	$\lambda$	vlnová délka (m)
	$k_{wi}$	počet příček typu $i$ , které protíná spojnice vysílač-přijímač
	$L_{wi}$	činitel útlumu pro příčku typu $i$ (dB)
	$k_f$	počet podlaží, která protíná spojnice vysílač-přijímač
	$L_f$	činitel útlumu pro průchod podlažím (dB)
	$b$	konstanta nelinearity útlumu průchodem skrz více podlaží (bez jednotky)

První člen výpočtu jsou ztráty volným prostorem pro vzdálenost  $d$ . Jedná se o One-Slope model, kde se počítá s parametrem  $n = 2,0$ . Parametr  $b$  určuje nelineární nárůst ztrát šířením větším počtem podlaží. Pokud se signál šíří skrz více podlaží, přestává být dominantní mechanismus šíření vlny skrz podlahy. Místo něj se objevují mechanismy vlnovodu ve výtahových šachtách a odrazy od okolní

zástavby. Běžně se za parametr dosazuje  $b = 0,46$ . Pokud se vlna šíří přes méně než tři podlaží, je možné u posledního členu výpočtu vynechat exponent a počítat pouze s lineární závislostí  $k_f L_f$ .

Pro simulaci je důležité rozmístění příček, ale není už tak důležitá jejich detailní charakteristika, protože model nepočítá s rozmístěním mobiliáře, vybavením, změnou polohy dveří a oken, které také může ovlivnit šíření vlny. Většinou si model vystačí s dvěma typy příček, slabá a silná. Doporučené parametry pro modely šíření signálů uvnitř budov jsou uvedeny v Tabulce 5.1 ze zdroje [4] pro frekvence v rozmezí 900 – 1300 MHz.

Typ příčky	Ztráty na příčce v dB
Látková přepážka	1,4
Dvojitá sádkartonová stěna	3,4
Fóliová izolace	3,9
Betonová zeď	13
Hliníkové bednění	20,4
Celokovová příčka	26

Tabulka 5.1: Ztráty na různých typech příček

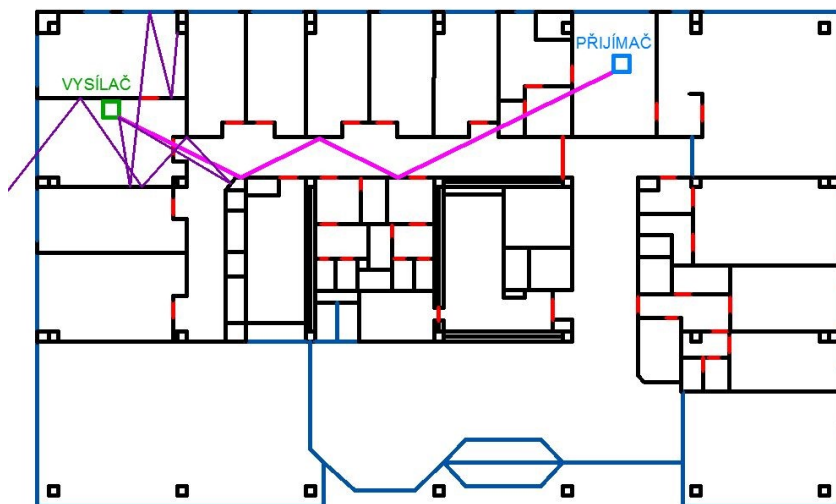
Pokud jsou empirické parametry vhodně zvoleny, celková odchylka se pohybuje kolem 5 dB. Predikce pokrytí u Multi-Wall modelu má postupný pokles signálu stejně jako One-Slope model, ale zahrnuje i příčky, což se projeví skokovou změnou úrovně signálu v těchto místech.

### 5.2.3 Optické modely

Optické modely patří mezi deterministické přístupy, které zohledňují zákony o šíření elektromagnetických vln, proto se takové modely označují jako fyzikální. Zohledňují především geometrické rozvržení objektů a jejich vlastností, což umožňuje přesně predikovat ztráty šířením. Řadí se do skupiny optických modelů, kde jsou elektromagnetické vlny zastoupeny množinou odrážejících se paprsků od objektů, které jsou větší, než je vlnová délka. To je pro pásmo UHF a objekty zástavby vcelku splněno. Jejich použití je nejvhodnější pro mikrobunčky a pikobunčky, kde je velké členění zástavby a empirické nebo semi-empirické modely jsou zde nedostačující. Dokážou predikovat i vícenásobné odrazy a řešit tak složité situace i při zastínění spoje. Paprsky podléhají fyzikálním zákonům popsaným v kapitole [3.1]. Mohou se tedy šířit i skrz překážky nebo se ohýbat na hranách střech a budov. Po mnohonásobných odrazech a ohybech vlna slábne a nese zanedbatelnou část energie. Proto se pro výpočty zadává omezený počet odrazů, průchodů a ohybů vlny, aby se zanedbatelné paprsky vypustily a zbyly pouze významné paprsky. V bodě příjmu se všechny vlny sčítají a zohledňují se i jejich parametry jako amplituda, fáze nebo směr přicházejícího paprsku. Obvykle se používají v 3D úlohách, ale lze je použít i pro zjednodušené 2D situace. Optické modely jsou velice náročné na výpočet, obsahují složité algoritmy, proto nacházejí široké uplatnění až v dnešní době výkonných počítačů. Tyto modely mohou mít rozdílnou implementaci, složitost a náročnost na vstupní parametry.

U optických modelů jsou dvě základní metody k nalezení významných paprsků. Nejvíce zastoupená je metoda Ray tracing, která hledá významné paprsky pomocí zrcadlení viz Obrázek 5.3.

Druhou metodou je Ray launching, která šíří paprsky do všech směrů a v místě dopadu paprsku na překážku vytvoří další bod pro vystřelení paprsků všemi směry. [2]



Obrázek 5.3: Metoda Ray tracing



## 6 Softwarové nástroje

Existuje několik desítek softwarových nástrojů pro predikci šíření signálů. Valná většina z nich je pro predikci šíření ve venkovním prostředí a obvykle se jedná o neplacené programy, protože je mezi tímto odvětvím softwaru velká konkurence a jsou v nich použity jednodušší algoritmy na výpočet. Pro predikci šíření signálů uvnitř budov existuje nástrojů poměrně méně a to v řádu jednotek. Tyto softwary obsahují složité algoritmy, které zohledňují značně členitější prostředí. Velké společnosti vytvářející tyto moderní programy, např. WinProp od firmy AWE-Communications, Ranplan Radiowave Propagation Simulator od firmy Ranplan nebo mnou použitý Wireless Insite od firmy Remcom, vytváří komplexní řešení jak pro vnitřní, tak i venkovní predikce. Mnoho dalších softwarů je však již neaktualizovaných nebo nedostupných, protože je překonala konkurence.

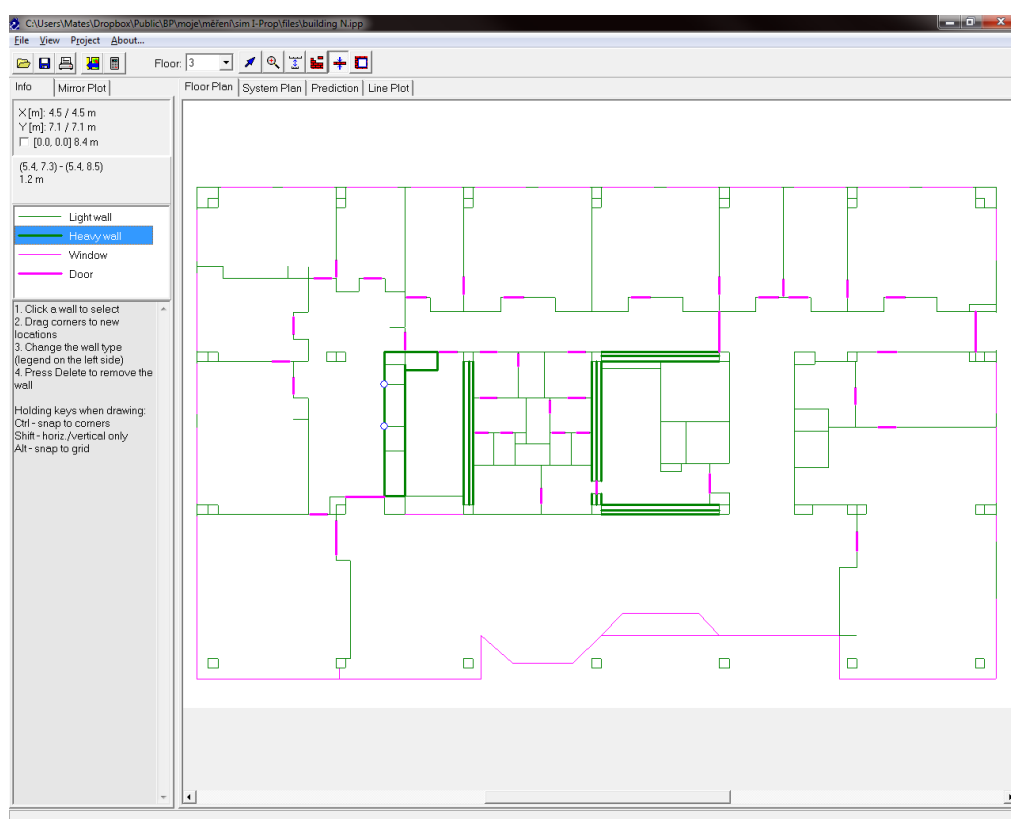
### 6.1 Dostupné softwarové nástroje

Software WinProp je dostupný v demo verzi, která je omezena časově i funkcemi. Zkušební licence je na 30 dní. Funkčně umožňuje jen tvorbu vstupních dat pro simulaci. Program Ranplan Radiowave Propagation Simulator firma inzeruje i ve zkušební verzi, ale ve skutečnosti není dostupný. Oba výše zmíněné proto nebyly použity. Softwarovou simulaci šíření signálu GSM jsem tedy provedl v dostupných nástrojích I-Prop, který má škola zakoupený, a Wireless InSite ve zkušební verzi.

#### 6.1.1 Popis I-Prop

Program I-Prop je placený software pro operační systém Windows. Je dostupný i v demo verzi, která umožňuje uživateli provést simulaci na již hotovém půdorysu ve formátu pro tento software. Nelze importovat nebo editovat nové půdorysy. Škola vlastní licenci tohoto programu, takže pro mne byl plně funkční. Autorem je Pavel Pecháč, který se specializuje na problematiku šíření signálů v zástavbě. Svůj software popisuje i ve svých publikacích, ze kterých jsem převážně čerpal, takže je pochopení použitých výpočetních modelů snadné. V softwaru jsou použity výpočetní modely One-Slope Model a Multi-Wall Model. Tento software začal vznikat v roce 1998 a jeho poslední verze vyšla v roce 2008.

Velkou výhodou je jednoduché vkládání hotových půdorysů budovy vytvořené v programu AutoCAD a přiřazení typů příček skupinám prvků v půdorysu. Tyto prvky jsou přehledně rozlišeny jinou barvou čáry a v editoru je možné je rychle editovat viz Obrázek 6.1. Hlavní okno programu zahrnuje jak editor půdorysu, tak i grafické vyhodnocení. Díky jednoduchosti programu a nízkému počtu ovládacích prvků je většina přístupná z hlavního okna.



Obrázek 6.1: Editor půdorysu I-Prop

Nechybí možnost importu půdorysu v běžných obrázkových formátech. Také je zde důležitá funkce ke změně velikosti půdorysu v měřítku. Zajímavou funkcí je možnost simulace více přístupových bodů najednou a zjištění jejich dosahů, včetně dominance přístupových bodů při překrývání pokrytých oblastí.

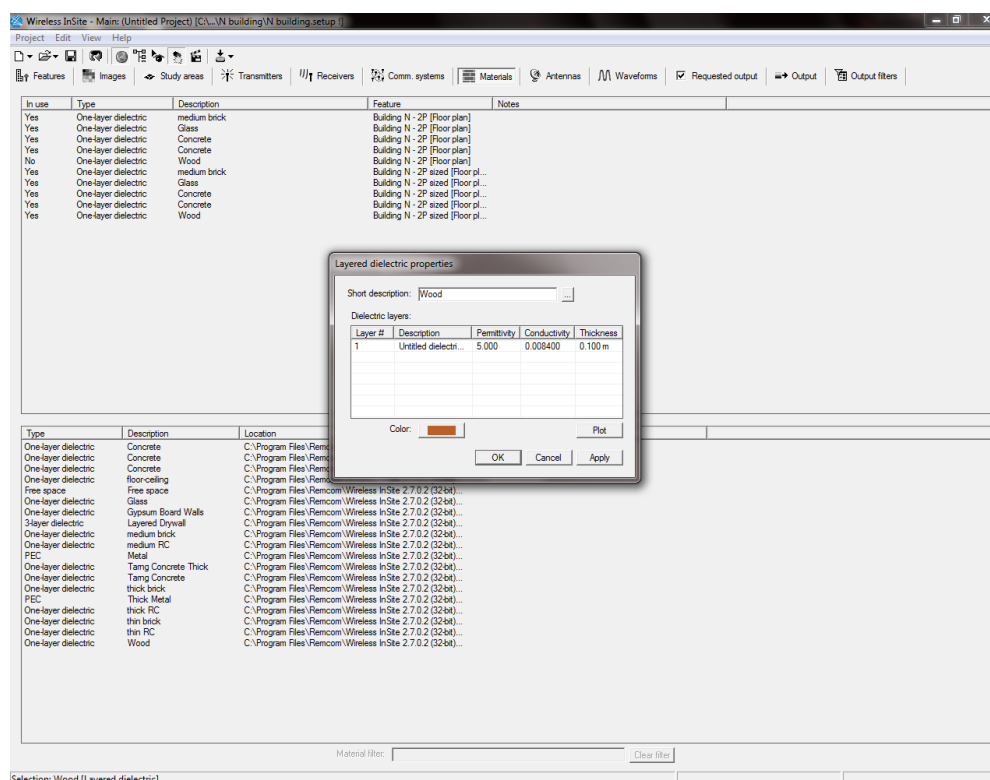
Nevýhodou tohoto programu je omezené rozmezí graficky zobrazované přijímané úrovně maximálně do úrovně signálu -100 dBm. Hodnota přijímané úrovně se přesto dá zjistit i za touto hranicí v textové podobě v levém horním rohu pomocí ukazatele kurzoru kdekoliv v grafickém výsledku viz Přílohy A.1. Dalším omezením přesnosti predikce je volba antény jen mezi směrovou nebo všesměrovou.

### 6.1.2 Popis Wireless InSite

Program Wireless InSite je placený a pochází od firmy Remcom. Software je možné provozovat pod operačním systémem Windows i Linux. Firma poskytuje svůj software i ve zkušební verzi, která je časově omezena na 30 dní a je plně funkční. Tento software je vyvíjen od roku 1994 až do současnosti, tedy roku 2014. Moderní simulační nástroj používá optický model s metodou Ray tracing, čímž se nejvíce liší od poměrně jednoduchého a dnes již zastaralého nástroje I-Prop. Dokáže tak reálněji vystihnout predikci šíření signálu v budově. V programu je možnost zvolit i různé implementace této výpočetní metody. Efektivní využití metody Ray tracing je dáno i dnešními výkonnými počítači s vícejádrovými procesory. Tento software umí používat pro své výpočty jak základní výpočetní procesor CPU, tak i grafický procesor GPU s podporou technologie CUDA. Tato technologie umožňuje

rozdělení mnoha operací do mnoha mikrooperací. Ty se pak provádí paralelně na řádově stovkách jader současně oproti přepočítávání přes CPU, kde je počet jader v řádu jednotek.

Výhodou programu je reálná predikce šíření signálu díky použitému výpočetnímu modelu. Další výhodou je přehlednost programu, kde jsou všechny používané prvky rozděleny do kategorií možností pro výpočty, vyzářovací diagramy antén, vlastnosti antén, vlastnosti přenosového pásma, parametrů pro materiály, nastavení přijímačů a vysílačů či možnosti různých typů výstupů. Všechny tyto kategorie jsou dostupné z hlavního okna programu viz Obrázek 6.2. Vedle hlavního okna je i vedlejší oddělené okno pro zobrazení grafických prvků. Toto zobrazení je výhodné při použití více monitorů, protože usnadní přepínání mezi konfigurační a zobrazovací částí nebo editorem půdorysu. Výsledky od přijímaných úrovní po zpoždění odražených vln nebo směru přicházející vlny k přijímači se dají zobrazit jak graficky, tak i textově. Jednotlivé prvky, např. typy příček nebo nastavení vysílačů, lze vkládat pomocí hotových databází ve spodní části okna viz Obrázek 6.2. Díky tomu jsou podrobná nastavení snadno přenositelná mezi projekty.



Obrázek 6.2: Hlavní okno programu Wireless InSite

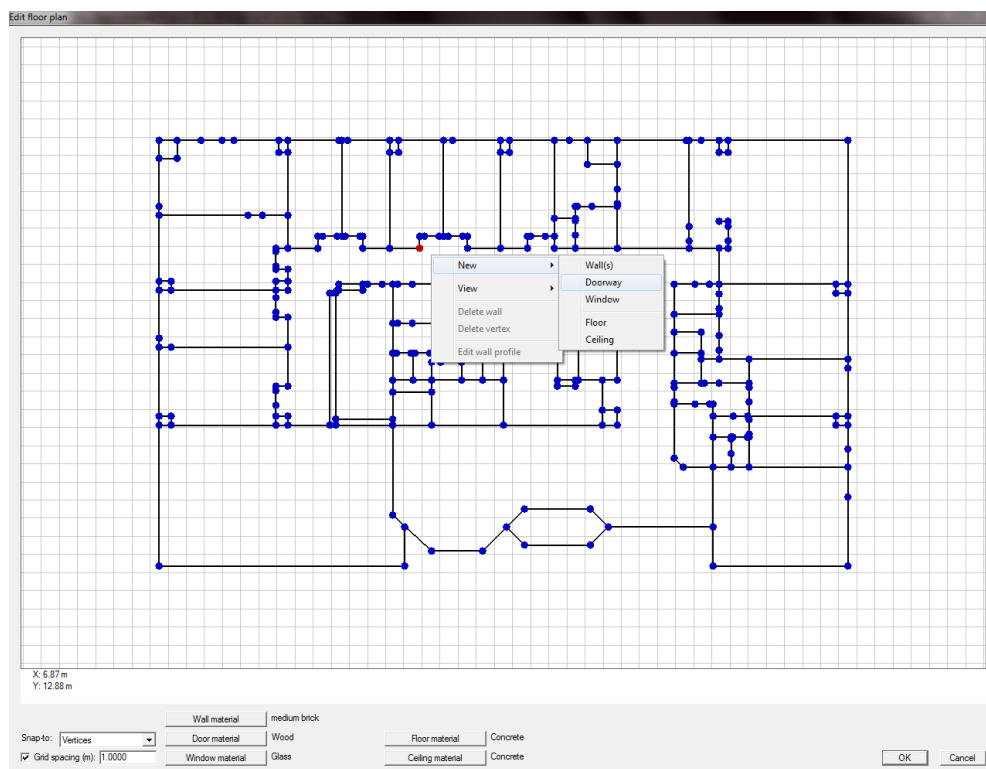
Software umožňuje také import půdorysu budovy z programu AutoCAD ve formátu DXF nebo obrázku, např. naskenovaný půdorys budovy v běžných obrázkových formátech.

Nastavení jednotlivých součástí je dosti podrobné, ale většina hodnot potřebných pro simulaci je předvyplněná ve standardních nastaveních, aby mohl uživatel vyzkoušet, zda simulace vůbec funguje, a pak nastavení doladit podle potřeb.

Na stránkách výrobce jsou dostupná doprovodná videa s ukázkami ovládání programu, která pomohou uživateli s orientací v prostředí a základním nastavením bez potřeby studia obsáhlého návodu.

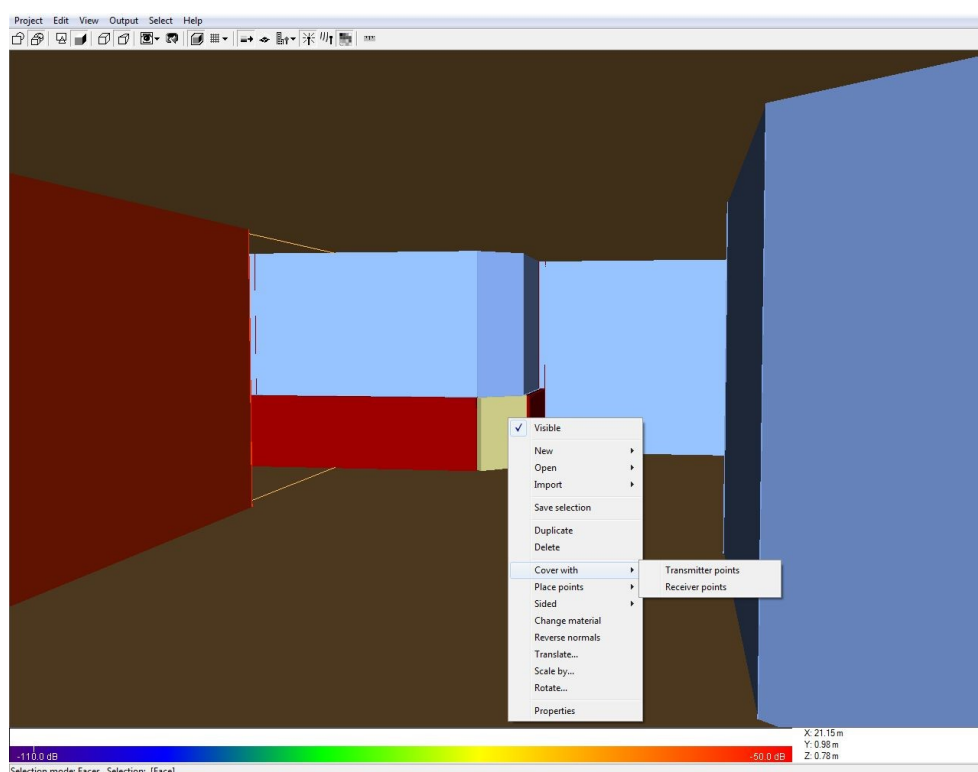
Videa se vztahují k hotovým ukázkovým projektům, které lze stáhnout z Internetu po přidělení přístupových práv výrobcem.

Nevýhodou tohoto programu je špatná přehlednost prvků v 2D editoru půdorysu, kde jsou různé prvky vyznačeny stejnou barvou, tloušťkou čáry i záchytnými body viz Obrázek 6.3.



Obrázek 6.3: Editor půdorysu Wireless InSite

Nejlépe se tento problém dá obejít přímou editací v 3D zobrazení viz Obrázek 6.4. V 3D modelu lze také upravovat výšku částí příček. Je zde také funkce změny velikosti v měřítku. V tomto zobrazení jde snadno přepínat mezi drátovým nebo pevným modelem, měnit perspektivu modelu, zobrazit graficky výsledky nebo promítat animaci šíření vln.



Obrázek 6.4: Editace v 3D zobrazení ve Wireless InSite

Zajímavá je i funkce animace šíření vlny, pomocí které je pak jasně zřetelné, jak se signál šíří nebo tlumí. Zobrazená vlna v animaci je také zbarvena podle barevného spektra přijímané úrovně.

Velkým nedostatkem je složité zjištění přesné hodnoty v daném místě. V grafickém zobrazení výsledku jsou hodnoty predikce přijímané úrovně reprezentovány barevným odstínem. Ty se musí porovnávat s odstínovanou stupnicí pod vyobrazením výsledku. Na stupnici je možné kurzorem zjistit přesnou reprezentovanou hodnotu daného odstínu viz výstupy v Přílohách A.2. Textový výstup (viz Obrázek 6.5) není propojen s grafickým zobrazením, proto je zjištění úrovně signálu možné jen podle vyhledání příslušného přijímacího bodu podle jeho identifikačního čísla.

Rx#	X(m)	Y(m)	Z(m)	Distance (m)	Power (dBm)	Phase (Deg.)
1	-0.9188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.11	-30.05	26.98
2	-0.8688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.00	-53.23	-32.60
3	-0.8188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.90	-55.47	-115.27
4	-0.7688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.80	-53.29	170.56
5	-0.7188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.73	-48.64	119.85
6	-0.6688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.66	-50.67	36.89
7	-0.6188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.60	-53.36	40.64
8	-0.5688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.56	-53.37	174.75
9	-0.5188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.53	-53.38	-8.28
10	-0.4688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.51	-49.45	-138.35
11	-0.4188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.50	-57.12	131.83
12	-0.3688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.51	-57.89	119.33
13	-0.3188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.53	-59.37	94.13
14	-0.2688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.56	-60.84	-167.98
15	-0.2188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.60	-58.17	119.02
16	-0.1688130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.65	-56.39	-109.40
17	-0.1188130E+01	-0.6178640E+01	1.000	20.72	-62.58	17.15
18	-0.0688130E+00	-0.6178640E+01	1.000	20.79	-61.08	66.72
19	-0.1881300E+00	-0.6178640E+01	1.000	20.88	-59.96	112.31
20	0.3118700E+00	-0.6178640E+01	1.000	20.98	-59.20	159.60
21	0.8118700E+00	-0.6178640E+01	1.000	21.10	-63.91	-172.78
22	0.1311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.22	-68.08	143.53
23	0.1811870E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.35	-62.08	-20.95
24	0.2311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.50	-63.99	-42.47
25	0.2811870E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.65	-64.95	112.36
26	0.3311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	21.82	-59.55	-43.09
27	0.3811870E+01	-0.6178640E+01	1.000	22.00	-55.30	-165.52
28	0.4311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	22.18	-63.34	43.68
29	0.4811870E+01	-0.6178640E+01	1.000	22.38	-61.62	84.61
30	0.5311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	22.58	-62.93	-125.61
31	0.5811870E+01	-0.6178640E+01	1.000	22.80	-64.23	-46.91
32	0.6311870E+01	-0.6178640E+01	1.000	23.02	-64.71	120.11

Obrázek 6.5: Příklad textového výstupu Wireless InSite

## 6.2 Srovnání softwarových nástrojů

Software I-Prop, který začal vznikat později, je jednoduchý a omezený na několik výpočetních modelů a je určen pouze pro predikci uvnitř budov. Naproti tomu software Wireless InSite obsahuje mnoho implementací optických modelů. Použití softwaru je všestranné jak pro šíření uvnitř budov, tak i pro městské či mimoměstské oblasti nebo objekty libovolných tvarů. I-Prop lze používat jen pod operačním systémem Windows, Wireless InSite je dostupný pro operační systémy Windows a Linux. Zkušební verze I-Prop je funkčně omezená oproti plně funkční časově omezené verzi softwaru Wireless InSite. Oba softwary umí pracovat s frekvenčním rozmezím pro většinu dnes běžně používaných služeb. Za pokročilejšími funkcemi a komplexností softwaru Wireless InSite stojí velká skupina vývojářů, proto je obsáhlejší než I-Prop.

Název	I-Prop	Wireless InSite
Vznik softwaru	1998	1994
Aktualizace	2008	2014
Licence	Demo, placená	Trial (30 dní), placená
Omezená licence	Omezený editor	Časové omezení
Podpora OS	Windows	Linux, Windows
Podpora modelů	One-Slope, Multi-Wall	Ray-Tracing
Výhody	Jednoduchost, rychlost	Ukázkové soubory a videa, přehlednost
Nevýhody	Zastaralý SW	Náročný na HW
Doporučení	Základní použití	Pokročilé použití

Tabulka 6.1: Srovnání softwarových nástrojů

## 7 Simulace a praktické měření

Jako měřený objekt mi posloužila školní budova, kde je umístěno vysílací zařízení. Použitá vysílací aparatura se skládá ze základnové stanice Huawei BTS3900 GSM, dvoupásmové směrové antény Kathrein 800 10465 a feedru LCF12-50JFN. Základnová stanice je nastavena na výstupní výkon 0,2W. Výkon je snížen pro potřeby výuky a testování přístrojů pouze v rámci školní budovy. Anténa je umístěna ve 2. podlaží budovy 2,6 m nad zemí a je směřována na dveře do chodby.

Jako měřicí zařízení jsem použil dva mobilní telefony různých výrobců a data výroby. Jedná se o modely Siemens S55 z roku 2002 a smartphone Sony Ericsson SK17i z roku 2011.

Měření jsem prováděl v pásmu GSM 900. BTS je nastavena pro vysílání na kanálu číslo 35, což odpovídá frekvenci 942 MHz.

Vyzářený výkon dipólovou anténou ERP jsem spočítal z následujících vstupních parametrů:

$$\text{Výkon nastavený na BTS: } P_{(W)} = 0,2 \text{ W} \quad (7.1)$$

$$\text{Přepočet hodnoty z W na dBm: } P_{(dBm)} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{(W)}}{1W} \right) + 30 = 23,0103 \text{ dBm} \quad (7.2)$$

$$\text{Zisk vysílací antény z datasheetu (Příloha B.1): } G_t = 7 \text{ dBi} \quad (7.3)$$

$$\text{Hodnota útlumu kabelu z datasheetu (Příloha B.2): } L_F = 7,04 \frac{\text{dB}}{100 \text{ m}} \quad (7.4)$$

$$\text{Ztráty konektoru: } L_C = 0,2 \text{ dB} \quad (7.5)$$

$$\text{Ztráty anténního svodu: } L_t = (n \cdot L_C) + (d \cdot L_F) = (2 \cdot 0,2) + \left( 10 \cdot \frac{7,04}{100} \right) = 1,104 \text{ dB} \quad (7.6)$$

$$\text{Vyzářený izotropní výkon: } EIRP = P + G_t - L_t = 23,0103 + 7 - 1,104 = 28,9063 \text{ dBm} \quad (7.7)$$

$$\text{Vyzářený výkon směrovou anténou: } ERP = EIRP - 2,16 = 26,7563 \text{ dBm} \quad (7.8)$$

### 7.1 Nastavení I-Prop

Pomocí softwaru AutoCAD jsem si upravil stávající půdorys budovy pro import do programu I-Prop, viz editace 2. patra (Obrázek 6.1). Nastavení hodnot útlumu podlažím a příčkami jsem volil stejné jako u simulace programem Wireless InSite viz Tabulka 7.1. Pro nastavení antény jsem zvolil směrovou anténu s vyzářeným výkonem vypočítaným ze vstupních dat Vyzářený výkon směrovou anténou:  $ERP = EIRP - 2,16 = 26,7563 \text{ dBm}$  (7.8) a s příslušnou frekvencí.

Umístění antény v místnosti, výšku antény a její směr jsem zvolil co nejvíce blížíci se realitě, viz Obrázek 7.1. Výpočet probíhal v řádu jednotek sekund.

**Base Station Parameters**

Description: GSM900 CH35 - directional

Location:

floor: 2

x [m]: 2.15

y [m]: 11.5

height [m]: 2.6

Antenna:

Directional

azimuth [°]: 125

elevation [°]: 0

Power:

P [dBm]: 23.0103

☒ ON

Frequency channel:

f [MHz]: 942

channel: 35

Cancel OK

Obrázek 7.1: Nastavení antény I-Prop

## 7.2 Nastavení Wireless InSite

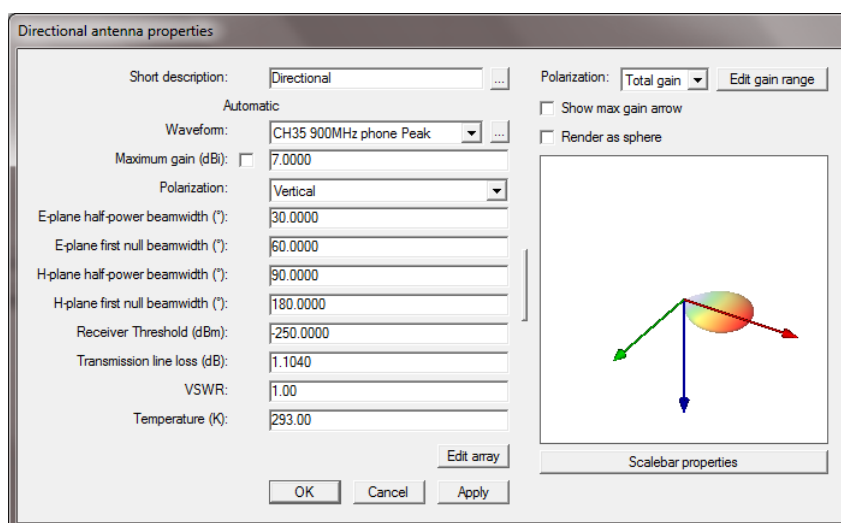
Import půdorysu z programu AutoCAD se nezdařil pravděpodobně z důvodu nesprávného formulování vstupních dat, která nesplňují normy pro simulační program. Půdorysy jsem vytvořil pomocí editoru ve Wireless InSite viz Obrázek 6.4. Hodnoty útlumů příček pro prvotní simulace mi posloužily přednastavené hodnoty z hotových projektů pro Wireless InSite. Poté jsem provedl individuální doladění modelu pro co nejpřesnější výsledky v porovnání s reálným měřením. Upravené hodnoty pro simulaci jsou uvedeny v tabulce Tabulka 7.1.

Typ příčky	Ztráty na příčce v dB
Tenká zeď	5,1
Tlustá zeď	15
Okna	2,4
Dveře	5
Podlaží	18,3

Tabulka 7.1: Ztráty na použitých typech příček

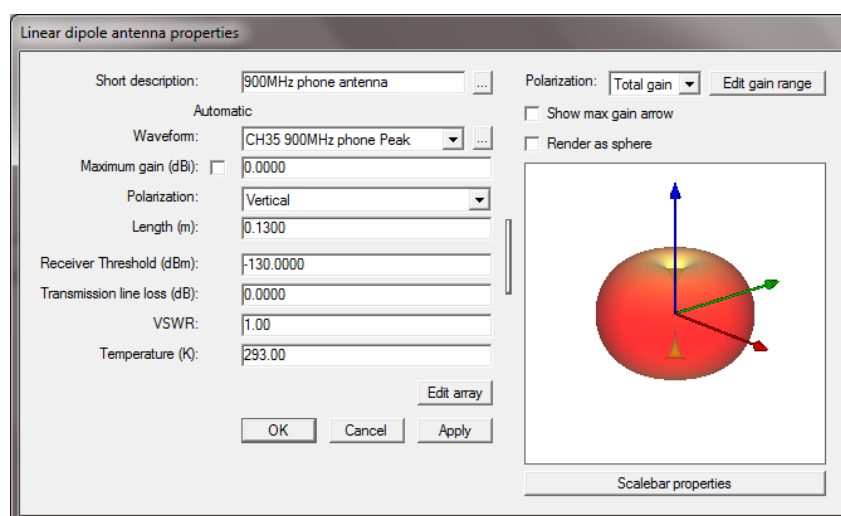
Pro simulaci jsem nastavil vyzařovací diagram vysílací antény podle geometrie a dat z datasheetu použité antény viz Příloha B.1.





Obrázek 7.2: Nastavení vysílací antény ve Wireless InSite

Nastavení antény mobilního telefonu jsem použil z hotových projektů pro Wireless InSite, kde zisk antény je 0 dBi a vyzařovací diagram antény je kruhový viz Obrázek 7.3. Prahová hodnota maximální přijímané úrovně je 130 dBm.



Obrázek 7.3: Nastavení přijímací antény ve Wireless InSite

Přenosové pásmo jsem nastavil na frekvenci 942 MHz podle vysílacího kanálu BTS. Simulace trvala přibližně 1 hodinu a 15 minut.

### 7.3 Popis praktického měření

Pro praktické měření jsem zvolil metodu odečítání hodnot ve stoje s natočením telefonu směrem k vysílací anténě, abych nestínil vlastním tělem. Telefon jsem držel standardním způsobem jako při psaní textové zprávy přibližně v úrovni 1,2 m nad zemí. Měřenou plochu jsem si rozdělil na čtvercový rastr bodů s rozestupy přibližně 2,6 m, ve kterých jsem prováděl měření, viz obrázky Obrázek 8.1, Obrázek 8.2, Obrázek 8.3. Odečet hodnoty jsem provedl zprůměrováním přijímané úrovně signálu

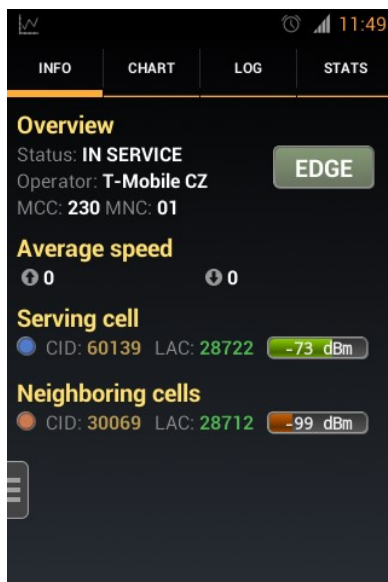
po dobu 15 sekund. Vyhodnocení naměřených hodnot je zobrazeno pomocí barevného spektra, kde jednotlivé barvy reprezentují určité rozmezí přijímané úrovně signálu. Rozsah úrovní pro každou barvu je 5 dBm.

Měření s mobilním telefonem Siemens S55 probíhalo pomocí servisního menu viz Obrázek 7.4, kde jsem podle čísla kmitočtového kanálu rozeznal příslušnou BTS a odečítal přijímanou úroveň signálu v dBm.

CH	RL	C1	C2	NB
5045	68	+38	+38	17
1110	70	+32	+32	10
2041	87	+19	+19	17
3089	93	+13	+13	17
4091	94	+12	+12	11
5095	00	+06	+06	14
6047	04	+02	+02	15

Obrázek 7.4: Servisní menu telefonu Siemens S55

Pro měření mobilním telefonem Sony Ericsson SK17i s operačním systémem Android 4.1 jsem použil aplikaci GSM Signal Monitoring dostupnou zdarma v oficiálním úložišti aplikací pro Android Obchod Play. Tato aplikace nezobrazuje číslo kmitočtového kanálu (viz Obrázek 7.5), protože samotné zdrojové kódy operačního systému Android neobsahují implementace pro zjišťování této hodnoty. Orientoval jsem se podle identifikačního čísla buňky CID. Na řádku s příslušným CID jsem odečítal přijímanou úroveň signálu stejně jako na druhém telefonu taktéž v jednotkách dBm. Po otestování více aplikací pro Android jsem zjistil, že všechny programy ukazují hodnoty stejně, jelikož přebírají interní data přímo z operačního systému.

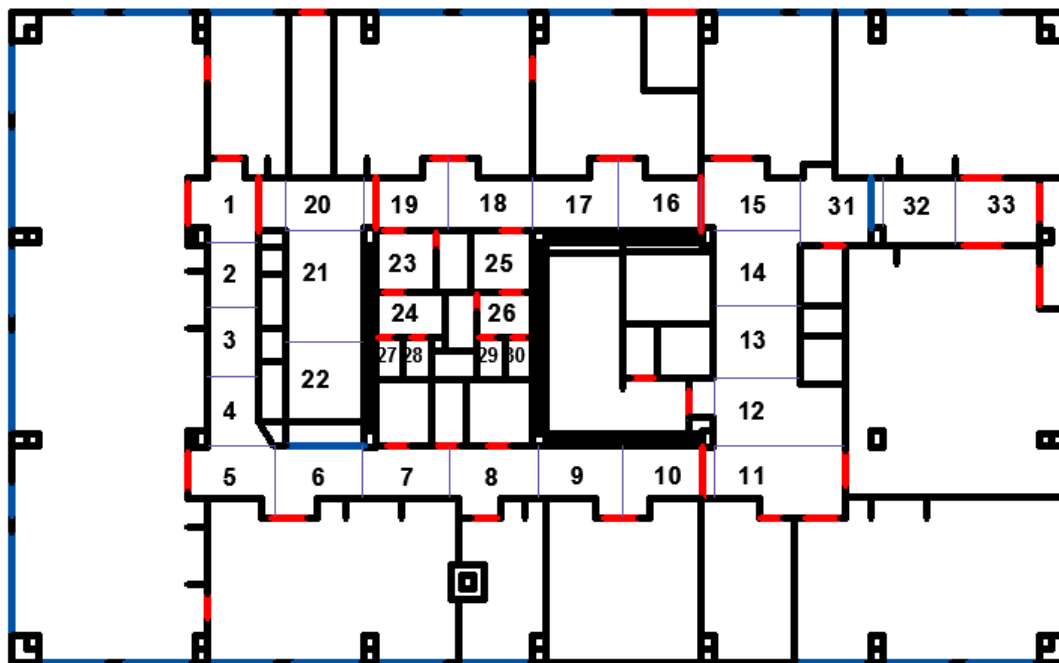


Obrázek 7.5: Aplikace GSM Signal Monitoring pro OS Android

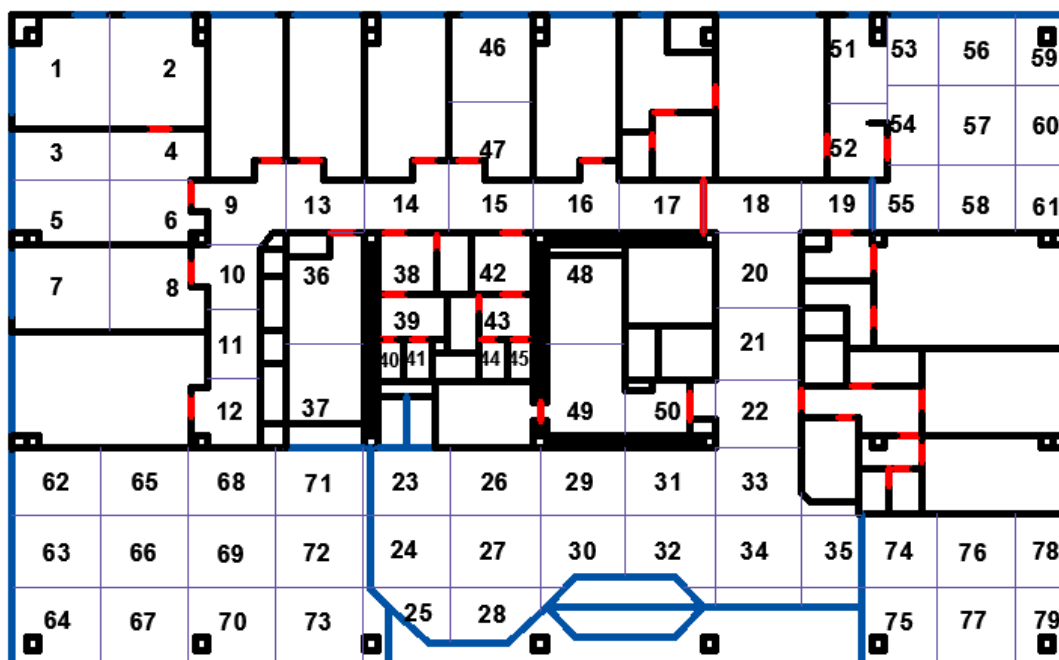
Pro vyhodnocení naměřených hodnot jsem zvolil grafickou metodu podobnou výstupu softwaru Wireless InSite s vybarvováním měřené oblasti příslušnou barvou podle síly přijímaného signálu.

## 8 Zpracování měření

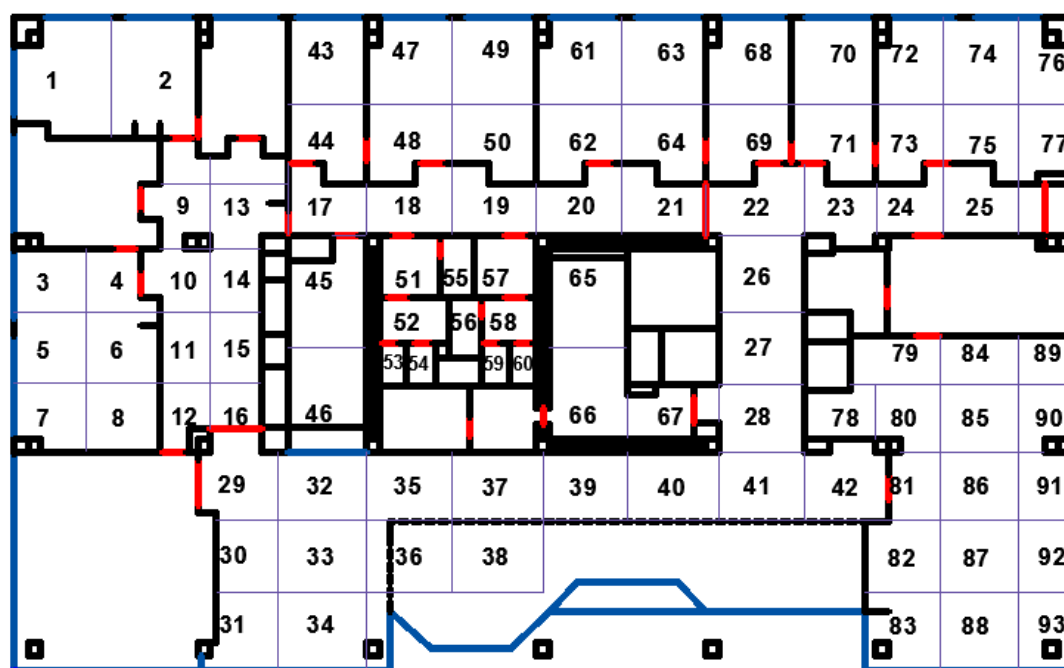
Porovnávání hodnot proběhlo podle bodů z rastru dle Obrázek 8.1, Obrázek 8.2 a Obrázek 8.3.



Obrázek 8.1: 1. patro – rozdělení na oblasti



Obrázek 8.2: 2. patro – rozdělení na oblasti



Obrázek 8.3: 3. patro – rozdělení na oblasti

Zaznamenané hodnoty pro každou oblast měření jsou uvedeny v tabulkách viz Příloha B.3 na CD. Touto metodou jsem se nechal inspirovat podle [6].

### 8.1 I-Prop

Největší nedostatek použitého modelu Multi-Wall se projevil ve velké vzdálenosti od vysílače za velkým počtem příček, kde hodnoty přijímané úrovně byly zkreslené až o dvojnásobek ostatních metod měření. Další velké zkreslení nastává v bezprostřední blízkosti u vysílací antény. To je způsobeno omezeným vyzářovacím diagramem antény v tomto softwaru a neschopností predikovat odrazy, jak si lze povšimnout v oblasti 3 ve 2. patře viz Příloha A.1, Obrázek A.2.

### 8.2 Wireless InSite

Predikce je ve většině měřených oblastí velice dobrá viz Příloha A.2, Obrázek A.5. Velké zkreslení nastalo v 2. patře v oblastech 3, 4, 5 a 6, které označují místnost s vysílací anténou. Hodnoty přijímané úrovně signálu jsou zde vyšší oproti referenčnímu měření mobilním telefonem. Zkreslení je nejspíš dáno velkým množstvím odražených paprsků nebo nesprávně zvoleným parametrem pohlcování vln povrchem. Další zkreslení je viditelné i ve 2. patře u oblastí 38 a 42. Predikce přijímané úrovně signálu je opět lepší.

### 8.3 Praktické měření

Pomocí staršího typu telefonu se mi podařilo změřit úroveň přijímaného signálu na více místech než se smartphonem a to až po hodnoty -116 dBm. Moderní smartphone naměřil nejnižší hodnotu -99 dBm. To je pravděpodobně dáno rozdílnou konstrukcí antén a ostatního vybavení telefonů. U staršího telefonu je primární funkcí příjem signálu pro hovor a posílání textových zpráv, tzn. anténa je více uzpůsobená této funkci. Také v době vzniku tohoto telefonu, tedy rok 2002, byla hustota BTS

menší, protože nebyla taková potřeba kapacity sítě pro velké množství uživatelů. Moderní telefony nabízejí daleko více funkcí a jsou vybaveny spoustou součástek jako fotoaparát, WiFi anténa, Bluetooth anténa, GPS anténa a různé senzory, které jsou v přístroji částečně na úkor příjmu signálu GSM. Primární funkce už tedy nejsou omezeny jen na přenos hovoru a posílání zpráv. Z těchto důvodů není třeba klást tak velký důraz na výrobu výkonné antény při dnešním hustém pokrytí stanicemi BTS. Měření telefonem Siemens S55 bylo dosti přesné, takže jsem jej určil jako referenční pro ostatní metody.

## 8.4 Porovnání

V softwarových simulacích není zakomponován nábytek, což ovlivňuje v malé míře výsledek predikce šíření signálu. V simulaci jsou všechna okna a dveře v zavřené poloze, oproti reálnému měření, kde některé tyto překážky byly pozmeněny ze zavřené polohy. Otevření dveří a oken mohlo zvýšit úroveň přijímaného signálu, ale ve valné většině jen zanedbatelně.

Podle očíslovaných oblastí měření v rastru jsem seřadil do tabulky hodnoty z obou simulačních softwarů i z obou praktických měření (viz Příloha B.3 na CD). Tyto hodnoty jsem poté srovnal vůči sobě v grafu (viz. Příloha A.5). Z grafů lze vyčíst, která metoda se od ostatních metod nejvíce odlišovala nebo vychýlila. V tomto případě je to softwarová metoda I-Prop. Jako nejpřesnější metodu bych označil měření mobilním telefonem Siemens S55. Dále je možné podle nich snadno určit problematickou oblast kritických úrovní signálu v případě, že by nebyl dostupný grafický výstup z měření nebo simulace.

Predikovaná úroveň moderním softwarem je mnohem přesnější než s jednoduchým softwarem. Znatelné je to především v oblasti zahnutých chodeb nebo za velkým počtem příček v oblastech stínu. Největší zkreslení nastalo v místech, kde se promíjejí výše zmíněné situace. I-Prop v 2. patře budovy v nejzastíněnějším místě (oblast číslo 35) určil hodnotu úrovně signálu -198 dBm, což je téměř dvakrát nižší než naměřené hodnoty -100 dBm pomocí telefonu Siemens S55 viz Tabulka 8.1. Wireless Insite a telefon Sony Ericsson SK17i v tomto bodě vykazují shodnou hodnotu úrovně signálu -83 dBm.

Číslo oblasti	I-Prop	Wireless InSite	Siemens S55	Sony Ericsson SK17i
26	-151	-85	-85	-79
27	-100	-71	-91	-91
28	-120	-68	-96	-
29	-145	-83	-92	-77
30	-156	-79	-92	-93
31	-195	-84	-102	-85
32	-137	-81	-	-
33	-183	-92	-99	-83
34	-197	-82	-90	-79
35	-198	-83	-100	-83

Tabulka 8.1: Srovnání hodnot – 2. Patro

Hodnoty ze softwaru I-Prop se oproti referenčnímu měření telefonem Siemens S55 liší v 1. patře v rozmezí od 30 dBm do 100 dBm. V 2. patře, kde je umístěn vysílač, je zkreslení menší než 1. patře a to v rozmezí od 20 dBm do 90 dBm. Oproti referenčnímu měření se ve 3. patře hodnoty rozcházejí od 50 dBm do 120 dBm. Oproti hodnotám z Wireless InSite jsou hodnoty I-Propu do přibližné vzdálenosti 15 m od přijímače podobné.

Hodnoty ze softwaru Wireless InSite se oproti referenčnímu měření rozcházejí v 1., 2. i 3. patře v rozmezí od 10 dBm do 40 dBm. Výsledky predikce zastíněných oblastí jsou poměrně přesné, ale valná většina nasimulovaných hodnot je větších než referenční měření. Tento problém se dá řešit jemným a zkušeným doladěním softwaru.

Hodnoty měření telefonem Sony Ericsson SK17i je možné srovnat pouze z 2. patra, protože v ostatních patrech telefon dokázal naměřit příliš málo hodnot k porovnání. V 2. patře se hodnoty oproti referenčnímu měření liší v rozmezí od 0 dBm do 30 dBm. Největší špičky odlišností hodnot jsou v místech okolo vysílače, kde je bezproblémový příjem signálu, takže jsou v praxi tyto výkyvy zanedbatelné.

Zkreslení softwaru může být způsobeno složitou implementací jevu šíření podél pláště budov popsaného v kapitole 3.1. Tento jev jsem ověřil pomocí měření mobilním telefonem, ale softwarovým nástrojem se jej nepodařilo nasimulovat.

## 9 Závěr

Přijímaná úroveň zjištěná praktickým měřením je velice různá v závislosti na použitém telefonu. Moderní telefon vykazoval v hodnotách přijímané úrovně velké skoky. Starší telefon ukazoval hodnotu přijímaného signálu oproti druhému telefonu nižší ve valné většině měření. Ale stále dokázal přijímat nízké úrovně signálu i v prostorách, kde moderní telefon signál nezaznamenal. Pro další měření by bylo nejvhodnější použití telefonu Siemens S55 jakožto referenční metody.

Výsledky ze softwaru I-Prop jsou pro prvotní predikce postačující. Pro složitější interiéry jsou použité výpočetní modely tohoto softwaru značně zkreslující a nedostatečné.

S rostoucím výpočetním výkonem a složitějšími výpočetními modely je vhodnější použití moderního softwaru, např. zmiňovaný Wireless InSite. Pro takovýto software je ale potřeba více vstupních dat, což zvyšuje i časovou náročnost na shromáždění těchto dat a následného nastavení softwaru. To souvisí i s finanční náročností.

Software bych spíše doporučil k lokalizování problematických oblastí, kde mohou úrovně signálu být kritické. V praxi se může vyskytnout mnoho vlivů, které mohou pozitivně i negativně ovlivnit výslednou přijímanou úroveň signálu.

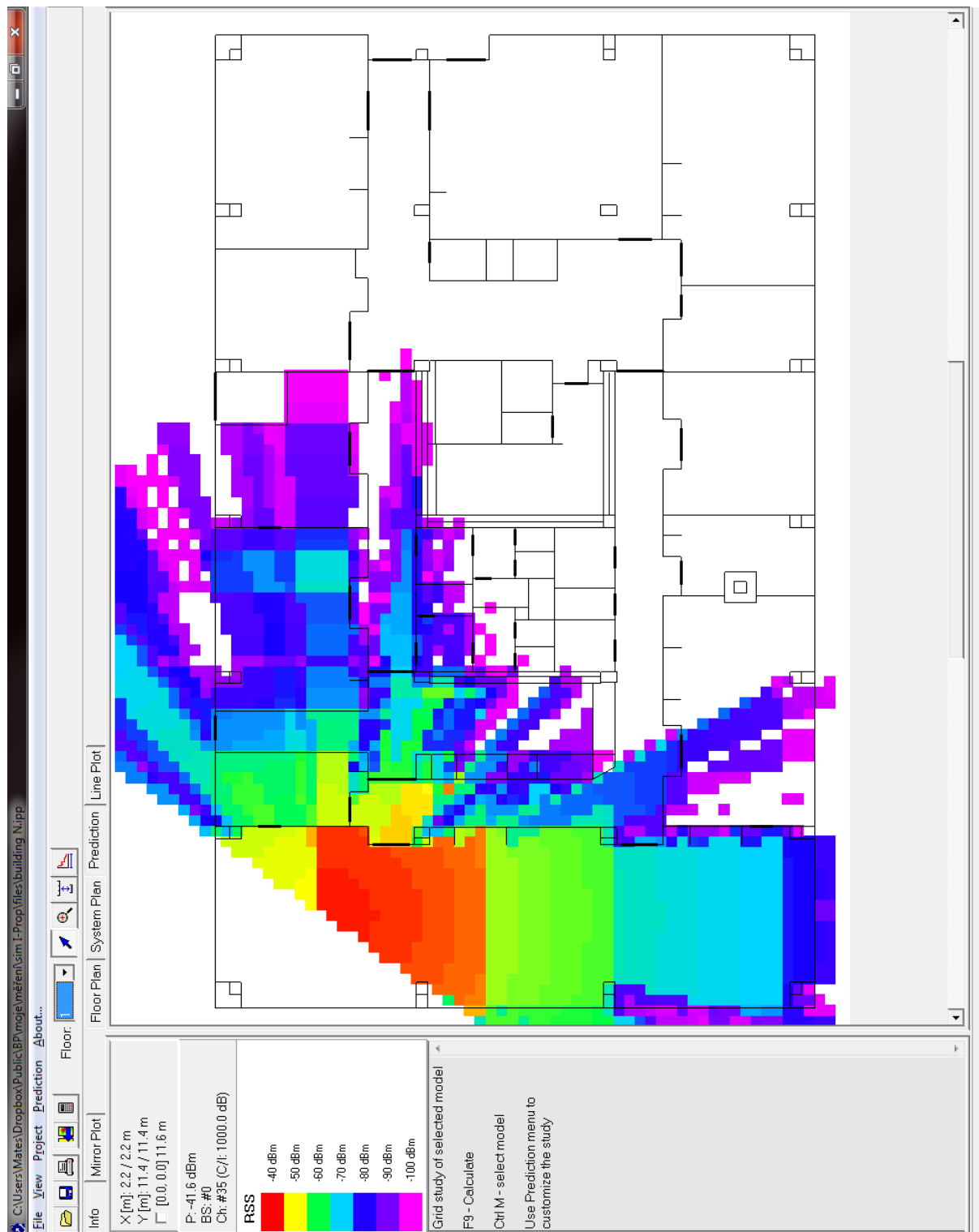
## Literatura

- [1] Pechač P., Zvánovec S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, BEN, 2007, ISBN: 978-80-7300-223-7
- [2] Pechač P.: Šíření vln v zástavbě, BEN, 2005, ISBN: 80-7300-186-1
- [3] Saunders S., Zavala A.: Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Wiley, 2007, ISBN: 978-0-470-84879-1
- [4] Andrea GoldSmith: Wireless Communications, Stanford University, 2004
- [5] Bc. Milan Vysloužil: Analytické a numerické řešení šíření EM vln v pásmu VHF a UHF po budovách, 2010
- [6] Bc. Martin Andres: Software pro určování polohy mobilního zařízení, 2013
- [7] Zdeněk Roudnický: Model vícecestného šíření signálu v budovách, 2008
- [8] <http://www.antenna-theory.com/> Antenna – Theory. [online]. 20.2.2014.  
URL: <http://www.antenna-theory.com/definitions/eirp.php>
- [9] <http://kabinet.fyzika.net> Fyzikální cabinet. [online]. 20.2.2014.  
URL: <http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/spektrum-elektromagnetickeho-zareni.php>

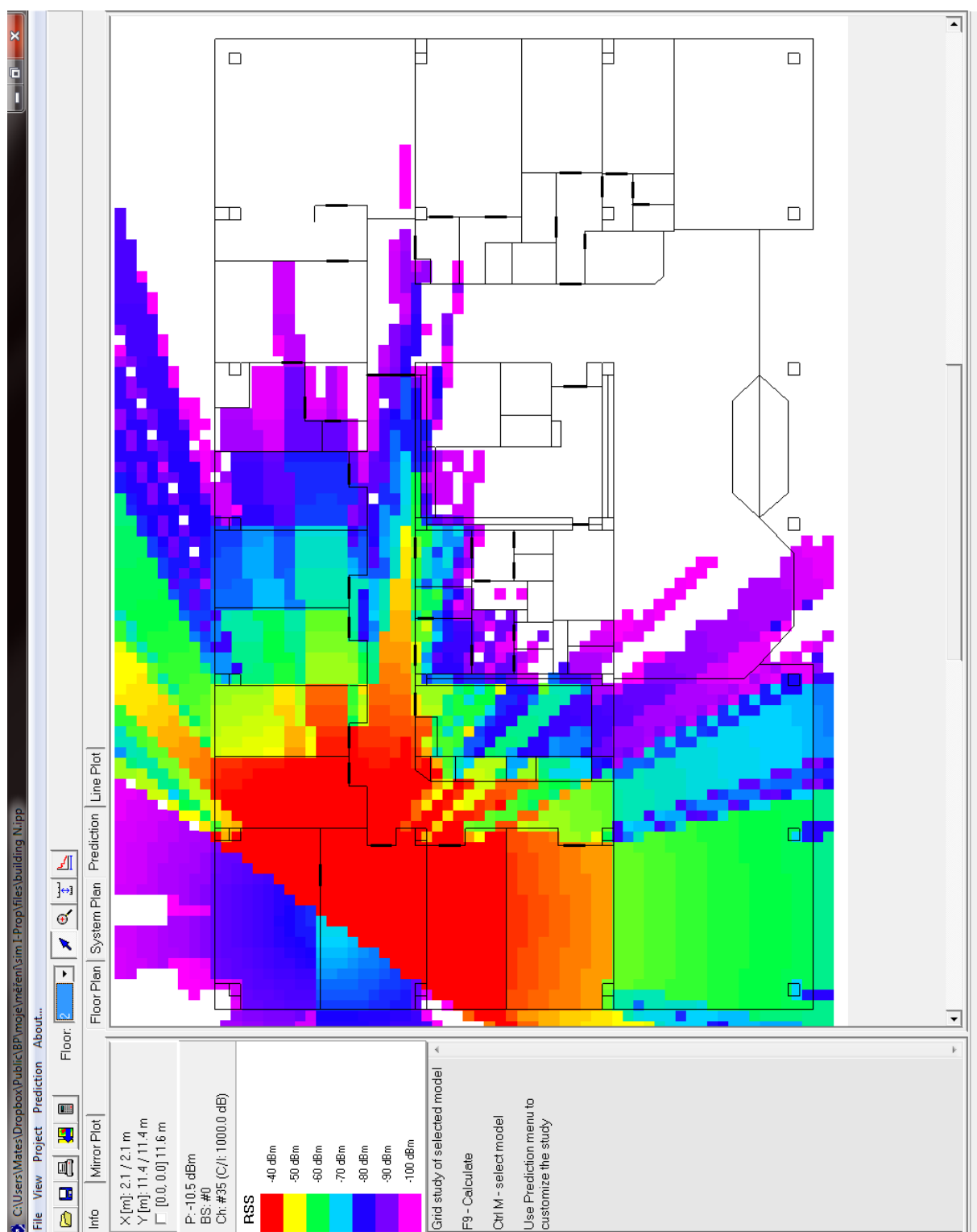


## A Příloha

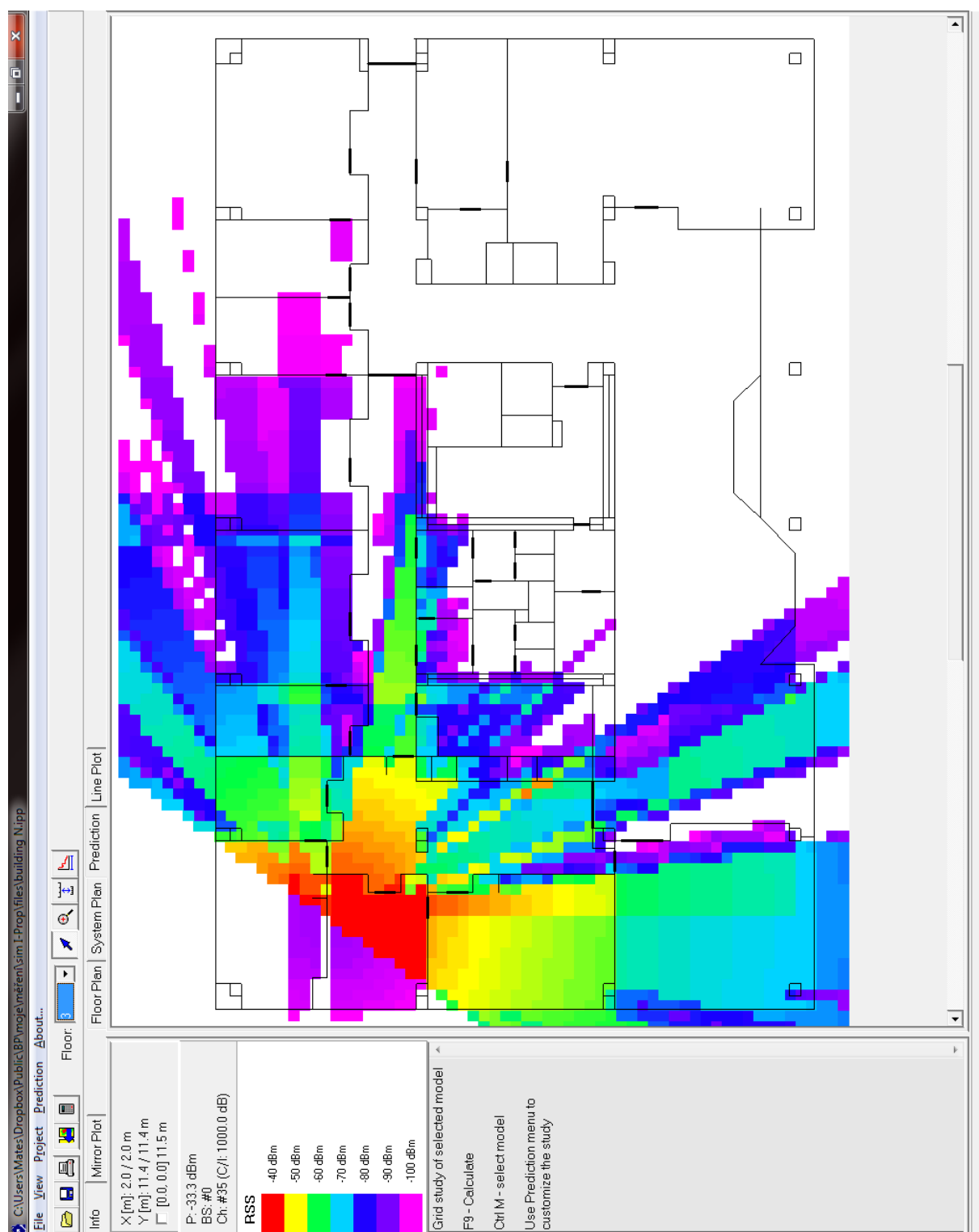
### A.1 Grafické výsledky ze softwaru I-Prop



Obrázek A.1: Predikce pokrytí signálem v softwaru I-Prop – 1. Patro



Obrázek A.2: Predikce pokrytí signálem v softwaru I-Prop – 2. Patro

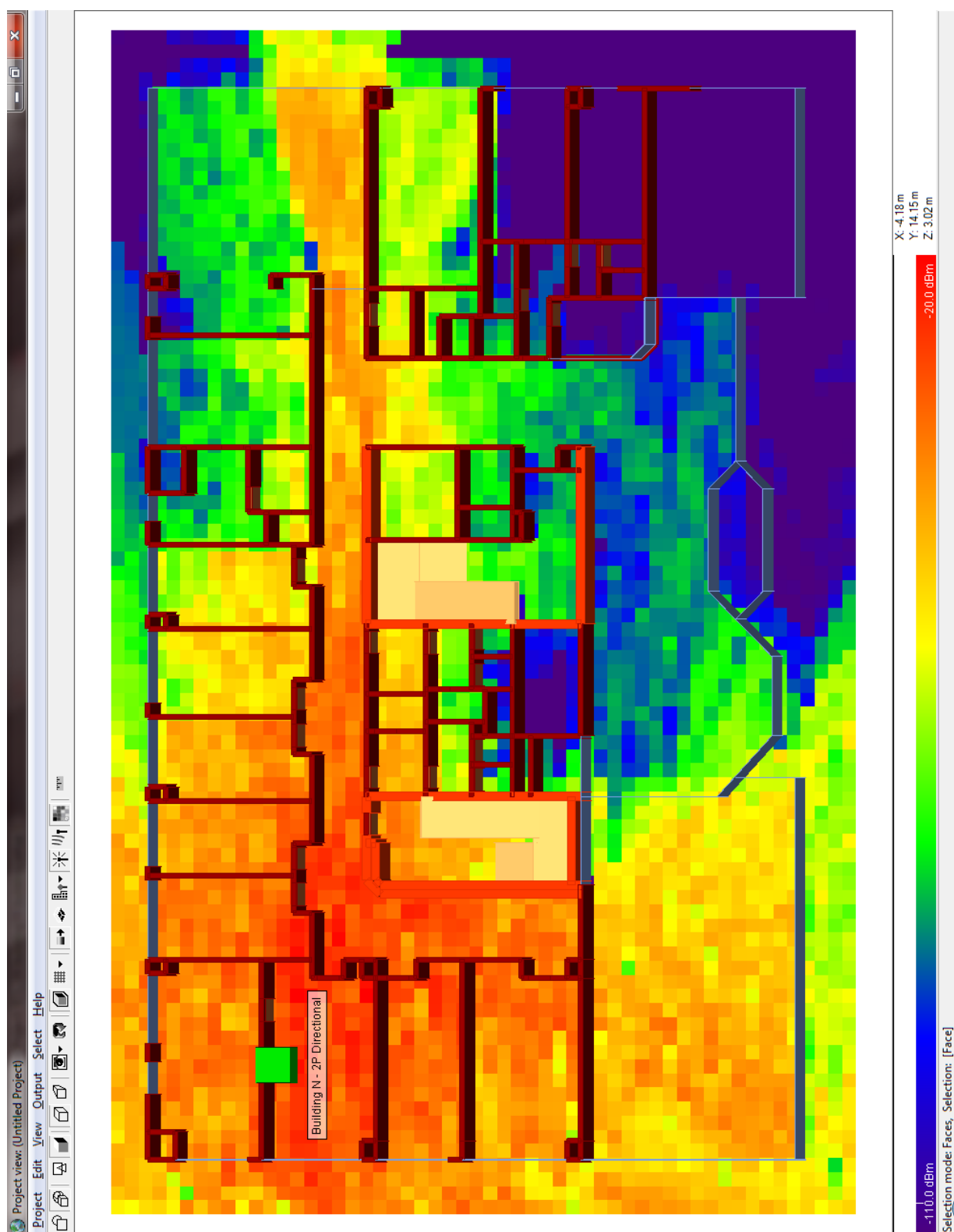


Obrázek A.3: Predikce pokrytí signálem v softwaru I-Prop – 3. patro

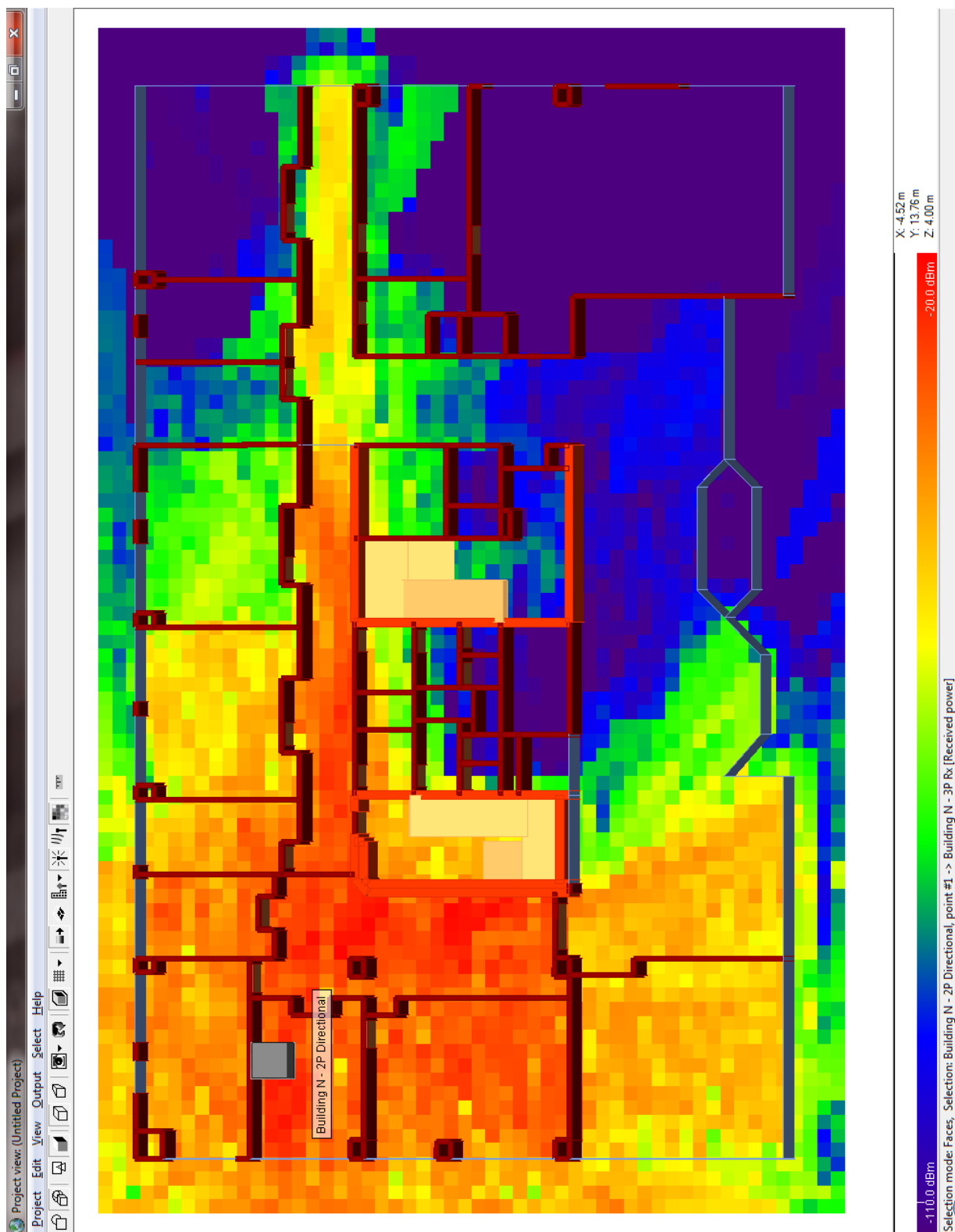
## A.2 Grafické výsledky ze softwaru Wireless InSite



Obrázek A.4: Predikce pokrytí signálem v softwaru Wireless InSite – 1. patro

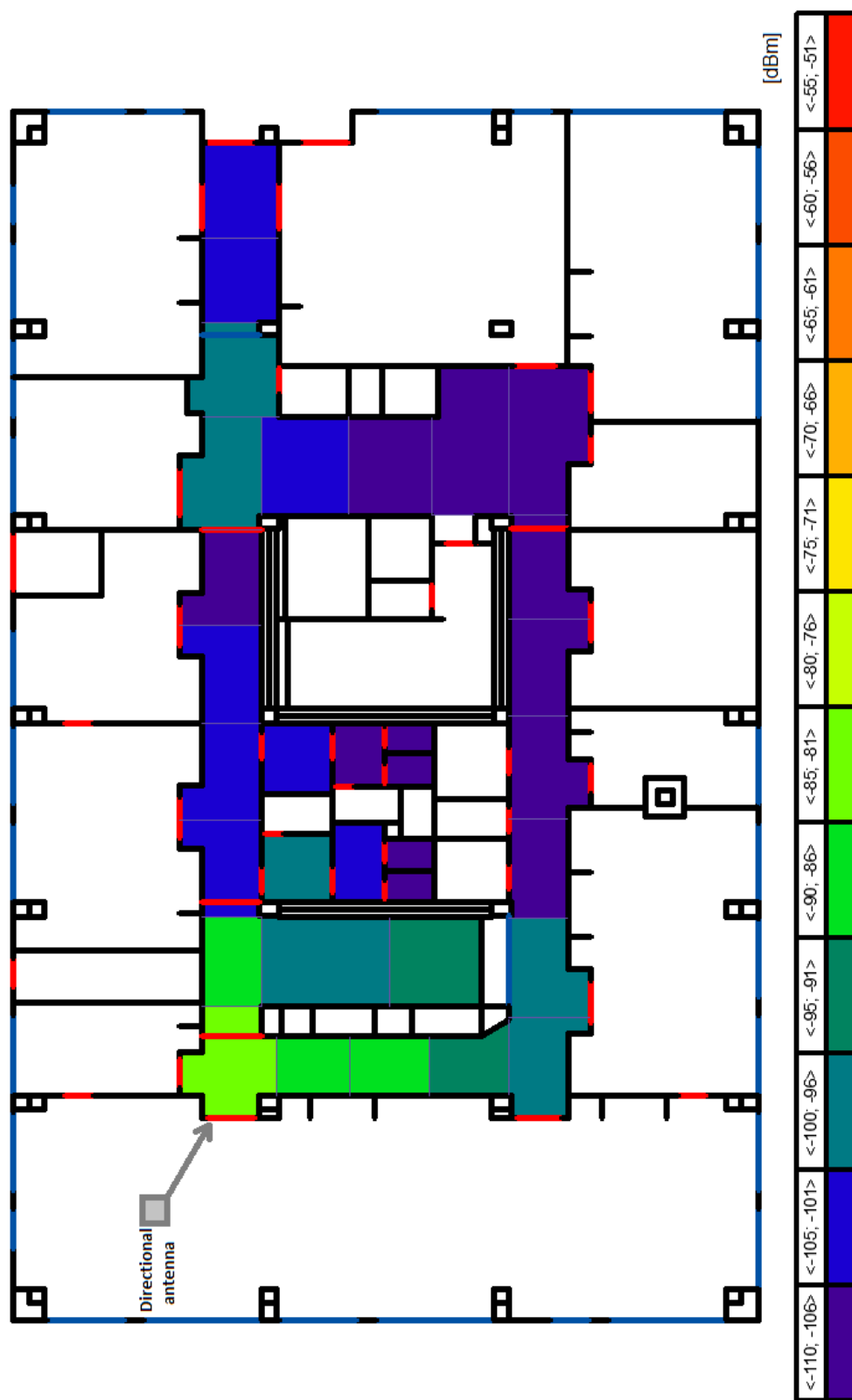


Obrázek A.5: Predikce pokrytí signálem v softwaru Wireless InSite – 2. patro



Obrázek A.6: Predikce pokrytí signálem v softwaru Wireless InSite – 3. patro

### A.3 Grafické vyhodnocení měření telefonem Siemens S55



Obrázek A.7: Grafické vyhodnocení měření telefonem Siemens S55– 1. patro



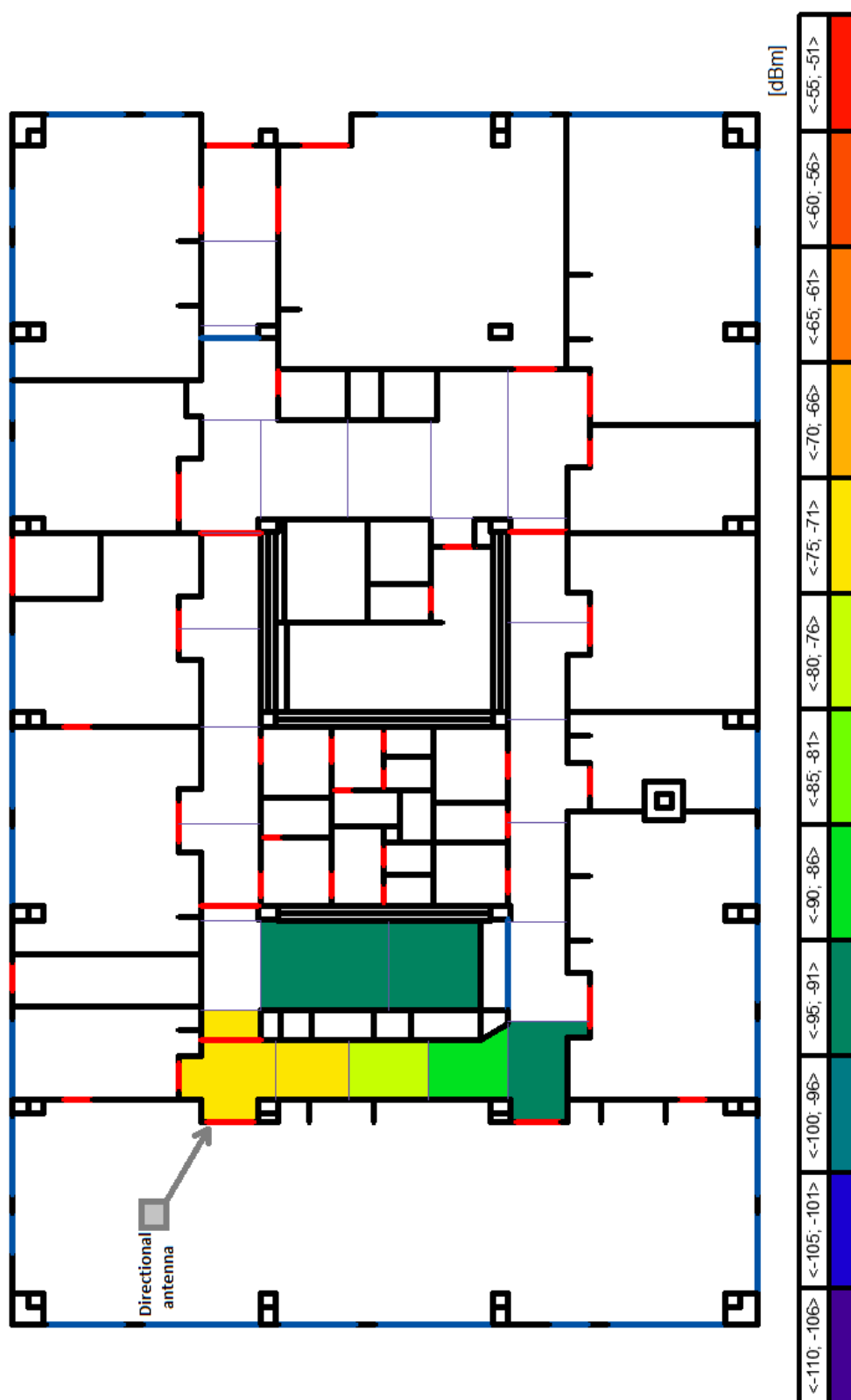
Obrázek A.8: Grafické vyhodnocení měření telefonem Siemens S55– 2. patro





Obrázek A.9: Grafické vyhodnocení měření telefonem Siemens S55– 3. patro

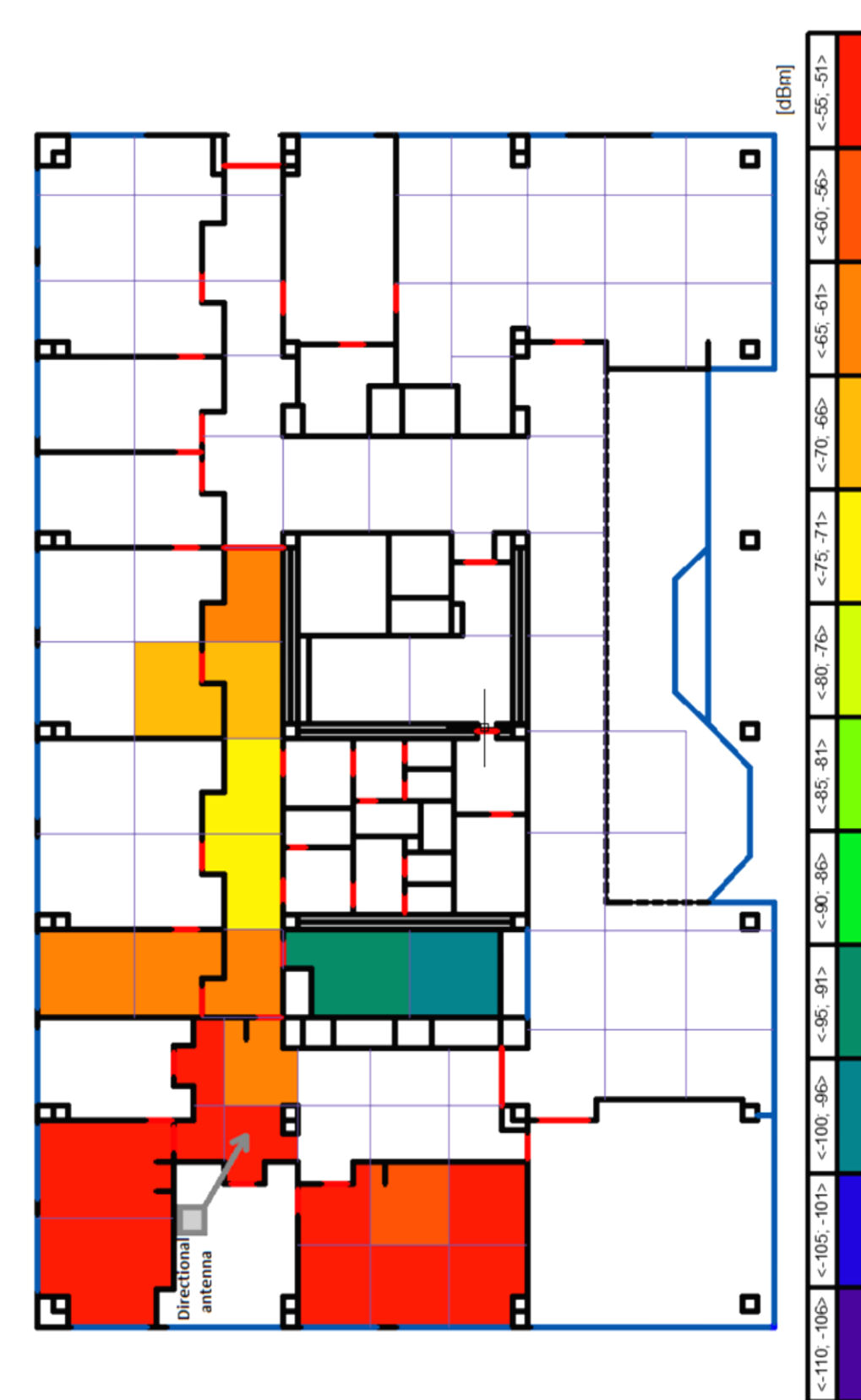
#### A.4 Grafické vyhodnocení měření telefonem Sony Ericsson SK17i



Obrázek A.10: Grafické vyhodnocení měření telefonem Sony Ericsson SK17i – 1. patro

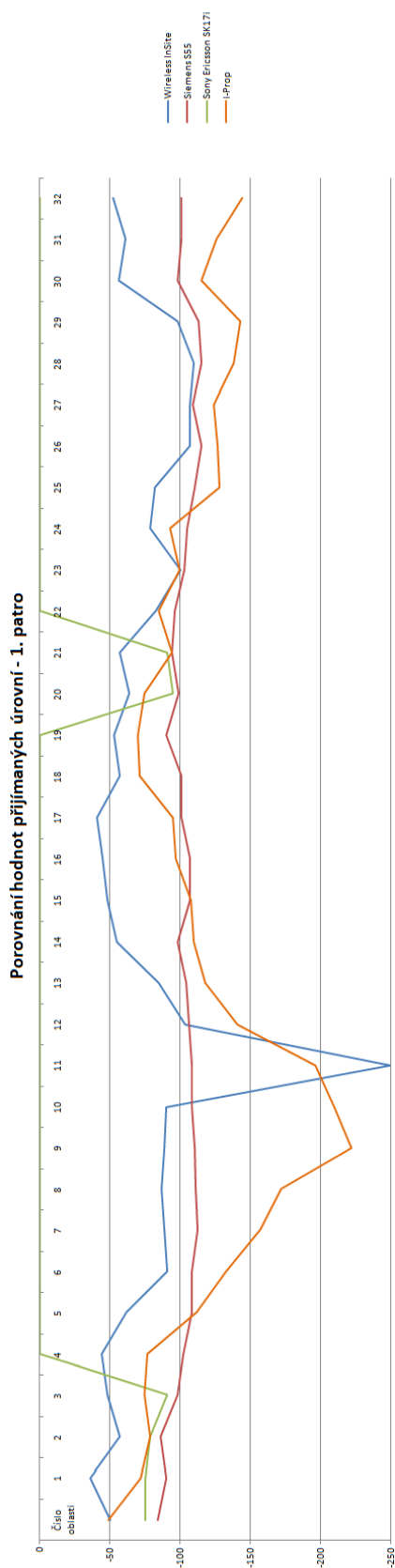


Obrázek A.11: Grafické vyhodnocení měření telefonem Sony Ericsson SK17i – 2. patro

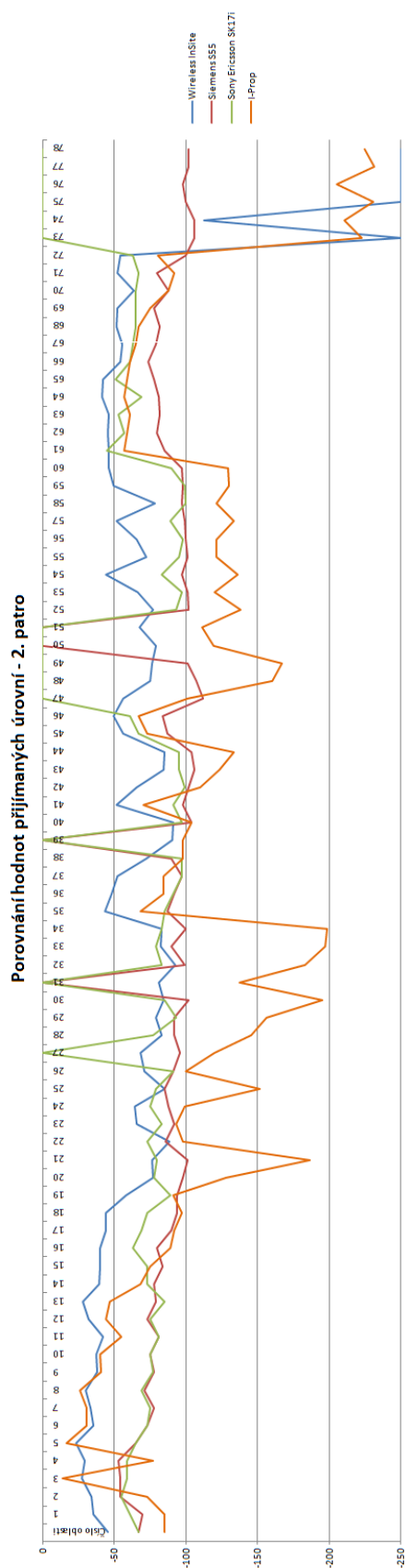


Obrázek A.12: Grafické vyhodnocení měření telefonem Sony Ericsson SK17i – 3. patro

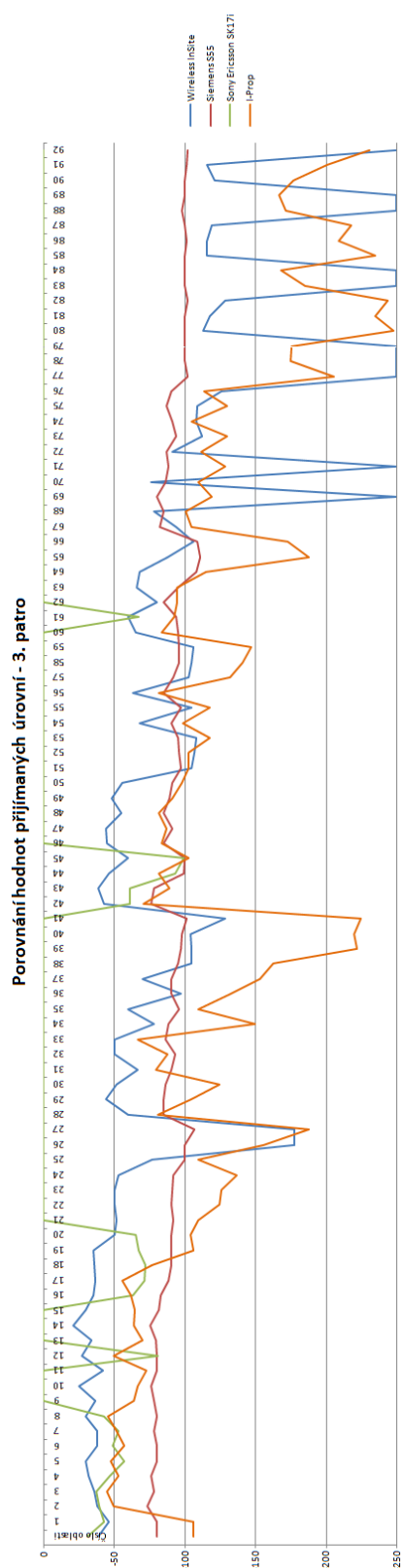
## A.5 Grafy hodnot přijímaných úrovní



Obrázek A.13: Graf hodnot přijímaných úrovní – 1. patro



Obrázek A.14: Graf hodnot přijímaných úrovní – 2. patro



Obrázek A.15: Graf hodnot přijímaných úrovní – 3. patro

## **B Elektronické přílohy**

### **B.1 Datasheet antény Kathrein 800 10465**

Soubor ve formátu PDF je umístěn na přiloženém CD: /CD/BP/datasheets/Kathrein 800 10465.pdf.

### **B.2 Datasheet feedru LCF12-50JFN**

Soubor ve formátu PDF je umístěn na přiloženém CD: /CD/BP/datasheets/LCF12-50JFN.pdf.

### **B.3 Tabulky naměřených hodnot**

Soubory ve formátu PDF jsou umístěny na přiloženém CD v adresáři: /CD/BP/tables/.